



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

Dottorato di ricerca in Ingegneria Geotecnica

XXVIII ciclo

Coordinatore

Prof. Ing. Claudio Mancuso

**MODELLAZIONE NUMERICA 3D DI POZZI DRENANTI PER IL
CONTROLLO DELLE PRESSIONI NEUTRE IN PENDII INSTABILI**

Marzo 2016

Relatore

Prof. Ing. Gianfranco Urciuoli

Candidato

Ing. Ferdinando Aloï

Ringraziamenti

Se sono riuscito a portare al termine questo lavoro, lo devo principalmente al mi professore Gianfranco, che negli anni della mia formazione accademica mi ha seguito ed aiutato a trovare l'equilibrio necessario per trasformare le mie idee in qualcosa di concreto. A lui va un ringraziamento speciale.

Ringrazio tutti i miei colleghi di dottorato, ricercatori, e professori presenti nel nostro dipartimento. Questa tesi è fatta di piccoli mattoncini e ciascuno di essi ne ha deposto almeno uno.

Ringrazio i miei genitori che mi hanno supportato e incoraggiato in ogni mia scelta accademica e non. A loro devo il mio amore verso la scienza, la natura e la tecnica, senza il quale avrei perso le speranze troppo presto.

Ringrazio i nonni che mi hanno dato senza mai chiedere, ed i miei fratelli che mi hanno fatto sentire a casa anche quando a casa non eravamo.

Ringrazio di cuore tutti i miei amici, che mi hanno dato la forza di superare i momenti difficili che ci sono stati.

In particolare ringrazio Ago, con lui ho condiviso tutto: sogni, passioni, delusioni, difficoltà, “E che te lo dico a fare”.

Ringrazio il “pallone”. Lui s'è preso tanti calci senza mai dire una parola. E senza saperlo mi ha regalato le soddisfazioni più belle e momenti che non dimenticherò mai.

*Infine, a chi legge questa tesi, poiché la vera gratificazione è il tempo che le dedica, sia esso anche un solo minuto,
...grazie*

Sommarior

Introduzione	1
1 Tecnologia dei drenaggi	4
1.1 Introduzione	4
1.2 Trincee drenanti superficiali	5
1.3 Trincee drenanti profonde	9
1.4 Dreni sub-orizzontali	13
1.5 Pozzi	14
1.5.1 Pozzi di piccolo diametro	15
1.5.2 Pozzi drenanti di medio diametro	17
1.5.3 Pozzi strutturali/drenanti di grande diametro	22
1.6 Gallerie drenanti	24
1.7 Sviluppi tecnologici nella realizzazione di opere di drenaggio	25
2 Progettazione delle opere di drenaggio	30
2.1 Introduzione	30
2.2 Efficienza dei drenaggi in un pendio indefinito	30
2.3 Moto dell'acqua nel sottosuolo: equazioni reggenti	33
2.4 Analisi delle condizioni al contorno	37
2.5 Soluzioni esistenti per il dimensionamento dei drenaggi	40
2.5.1 Trincee drenanti	40
2.5.1.1 Condizioni di flusso piane	41
2.5.1.2 Condizioni di flusso tridimensionali	46
2.5.2 Dreni Sub-orizzontali o microdreni	48
2.5.2.1 Condizioni di flusso piane	49
2.5.2.2 Condizioni di flusso tridimensionale	53
2.5.3 Pozzi Drenanti	56
2.5.3.1 Procedura di progetto per il sistema RODREN	56
2.5.3.2 Formule dell'idraulica dei mezzi porosi	57
2.5.3.3 Analisi numerica piana con sezione drenante equivalente	58
2.6 Alcune considerazioni sul progetto dei drenaggi con l'ipotesi di lama d'acqua al piano campagna	63
3 Modellazione 3D di pozzi drenanti	67
3.1 Introduzione	67
3.2 Elementi di teoria delle differenze finite	67
3.2.1 Approssimazione della derivata prima	68
3.2.2 Approssimazione della derivata seconda	69

3.2.3	Approssimazione delle derivate su griglie non uniformi	71
3.2.4	Il metodo di Eulero esplicito	71
3.3	Schema geometrico	76
3.4	Calibrazione delle dimensioni del dominio	77
3.5	Calibrazione della mesh	78
3.6	Condizione iniziale	80
3.7	Condizioni al contorno	81
3.8	Implementazione in Matlab	82
3.8.1	Input del modello	82
3.8.2	Discretizzazione del dominio	83
3.8.3	Adimensionalizzazione	84
3.8.4	Verifica della condizione di stabilità	84
3.8.5	Inizializzazione	85
3.8.6	Condizione iniziale	86
3.8.7	Condizioni di Dirichlet	87
3.8.8	Coordinate dei punti appartenenti ai pozzi	87
3.8.9	Ciclo di calcolo alle differenze finite	88
3.9	Output del codice	92
3.10	Validazione del codice numerico	94
4	Dimensionamento di sistemi reticolari di pozzi	99
4.1	Introduzione	99
4.2	Ottimizzazione del sistema di pozzi drenanti	99
4.3	Analisi parametriche	101
4.4	Abachi per il dimensionamento del sistema reticolare a maglie quadre	103
4.4.1	Condizioni stazionarie	103
4.4.2	Condizioni transitorie	106
5	Interazione dei pozzi drenanti con le fluttuazioni stagionali della falda	110
5.1	Introduzione	110
5.2	Modellazione del sistema di drenaggio in presenza di fluttuazioni stagionali delle pressioni neutre	110
5.3	Implementazione in Matlab	112
5.3.1	Condizione al contorno superiore	112
5.3.2	Condizione sui punti appartenenti al volume drenante: superficie di filtrazione	112
5.4	Effetto del sistema drenante sulle fluttuazioni stagionali delle pressioni neutre	118
5.5	Confronto tra soluzioni con condizione a p.c. variabile e lama d'acqua	122
6	IL SOFTWARE drenando	125
6.1	Introduzione	125
6.2	Presentazione del software	126
6.3	Input	127

6.3.1	Trincee	127
6.3.2	Rete di pozzi	128
6.3.3	Pozzo singolo	129
6.3.4	Aste a raggiera	130
6.3.5	Batteria di aste	132
6.4	Output	132
6.4.1	Trincee	133
6.4.1.1	Pressioni neutre	133
6.4.1.2	Pressioni neutre sulla superficie di scorrimento	133
6.4.1.3	Pressioni neutre nel tempo	134
6.4.1.4	Flusso	135
6.4.2	Rete di pozzi	136
6.4.2.1	Superficie piezometrica	136
6.4.2.2	Slice u	137
6.4.2.3	Inviluppi pressione-profondità	138
6.4.2.4	Inviluppi efficienza-profondità	139
6.4.2.5	Efficienza vs tempo	139
6.4.2.6	Cedimenti al piano campagna	140
6.4.3	Pozzo singolo	141
6.4.3.1	Superficie piezometrica	141
6.4.3.2	Slice u	142
6.4.3.3	Efficienza vs tempo	142
6.4.4	Aste a raggiera	143
6.4.4.1	Superficie piezometrica	143
6.4.4.2	Slice u	144
6.4.4.3	Efficienza vs tempo	144
6.4.5	Batteria di aste	145
6.4.5.1	Superficie piezometrica	145
6.4.5.2	Slice u	146
6.4.5.3	Efficienza vs tempo	146
Conclusioni		148
Bibliografia		151

Indice delle figure

Figura 1.1: trincea superficiale con soli rami principali: a) pianta; b) sezione trasversale (lungo curve di livello). Trincea superficiale con rami principali e secondari: c) pianta; d) sezione longitudinale.	6
Figura 1.2: trincee superficiali con strato superiore ricoperto di pietre per ridurre l'impatto ambientale.	6
Figura 1.3: escavatore utilizzato per trincee fino ad una profondità di circa 5 m dal suolo.	7
Figura 1.4: scavo con pareti verticali e blindaggio.	8
Figura 1.5: schema di una trincea superficiale: particolari di realizzazione.	8
Figura 1.6: pannelli di polistirene avvolti in geotessile.	9
Figura 1.7: trincee profonde con soli rami principali: a) pianta, b) sezione trasversale. Trincee superficiali, con rami principali e secondari: c) pianta, d) sezione longitudinale.	10
Figura 1.8: benna a valve utilizzata per trincee profonde.	10
Figura 1.9: schema di trincee strette con geocomposito e tubi.	11
Figura 1.10: esempio di trincee strette con geocomposito.	12
Figura 1.11: tecnica di pali secanti: a) prima serie di pali, b) serie di pali pari.	12
Figura 1.12: schema di intervento con aste drenanti	13
Figura 1.13: classificazione dei pozzi.	14
Figura 1.14: pozzi con pompe.	16
Figura 1.15: schema di funzionamento del sistema con dreni sifone (WJ Groundwater Ltd).	16
Figura 1.16: pozzetto di regolazione terminale del sistema con dreni sifone.	17
Figura 1.17: schema esecutivo dei pozzi drenanti di medio diametro (Manassero V., 2001).	18
Figura 1.18: incidenza della profondità sui costi unitari di pozzi e trincee drenanti.	18
Figura 1.19: planimetria e sezione longitudinale di un allineamento di pozzi drenanti: la frana di Perugia Fontivegge, stabilizzata con più di 300 pozzi e 1800 metri di condotte.	19
Figura 1.20: sezioni longitudinali delle diverse tipologie di pozzi: strutturale (sinistra), ispezionabile (centro), drenante (destra).	20
Figura 1.21: schema tipico di attrezzatura di perforazione per condotte di fondo (Manassero V., 2001).	21
Figura 1.22: cassone con coronella di pali.	23
Figura 1.23: autostrada A16 Napoli-Canosa; movimento franoso al km 106+250. Planimetria dell'intervento di drenaggio profondo (Leoni F. e Manassero V., 2003).	24
Figura 1.24: gallerie di drenaggio con aste drenanti.	25
Figura 1.25: particolare della testa perforante teleguidata.	26
Figura 1.26: schema d'impianto di teleguida.	27

Figura 1.27: schema di realizzazione di una condotta di fondo con tecnologia HDD, per un allineamento posto lungo la linea di massima pendenza, nella parte relativa allo scarico di valle (Manassero V., 2001).	28
Figura 1.28: schema di realizzazione di una condotta di fondo con tecnologia HDD, per un allineamento sub-parallelo alle curve di livello (Manassero V., 2001).	28
Figura 1.29: scarico di fondo dei pozzi drenanti realizzati per la stabilizzazione del movimento franoso di Camerana.	29
Figura 2.1: schema di pendio indefinito con filtrazione parallela al piano campagna.	31
Figura 2.2: isocrone di pressioni neutre su un piano passante per la base di trincee drenanti.	32
Figura 2.3: schema delle condizioni al contorno i presenza di drenaggi: a) lama d'acqua, b) superficie impermeabile, c) superficie libera; adattato da Desideri et al., 1997.	38
Figura 2.4: effetto delle condizioni al contorno e della porosità efficace sull'evoluzione dell'efficienza nel tempo (Burghignoli e Desideri, 1987): 1) effetto porosità efficace n_e ; 2) apporto non nullo $q/k_v=0,25$.	39
Figura 2.5: schema geometrico considerato da Desideri et al. (1997).	41
Figura 2.6: abachi per il dimensionamento di un sistema di trincee drenanti (Desideri et al., 1997).	42
Figura 2.7: evoluzione temporale del processo indotto da un sistema di trincee drenanti (Desideri et al., 1997).	43
Figura 2.8: evoluzione dell'efficienza in funzione della distanza tra le trincee, nel caso di piano campagna impermeabile (Di Maio et al., 1986).	43
Figura 2.9: evoluzione dell'efficienza nell'ipotesi di superficie libera (Burghignoli e Desideri, 1983).	44
Figura 2.10: valori del fattore tempo T_{50} e T_{90} in funzione dei parametri geometrici (Burghignoli e Desideri, 1983).	45
Figura 2.11: evoluzione dell'efficienza nell'ipotesi di flusso intermittente al piano campagna.	45
Figura 2.12: abachi di Stanic (1984) per il calcolo del livello piezometrico normalizzato.	47
Figura 2.13: dominio di integrazione per il caso di trincee con rami secondari.	48
Figura 2.14: efficienza media stazionaria per trincee drenanti con rami secondari, analisi 3D.	48
Figura 2.15: effetto di g ed m sull'evoluzione dell'efficienza (Burghignoli e Desideri, 1987).	50
Figura 2.16: schema geometrico per un sistema di dreni sub-orizzontali analizzato da Desideri et al., 1997.	51
Figura 2.17: singolo livello di dreni: a) posizione relativa ottimale; b) efficienza media a regime; c) fattore tempo T_{50} ; d) fattore tempo T_{90} ; (Desideri et al., 1997).	52
Figura 2.18: doppio livello di dreni: a) posizione relativa ottimale; b) distanza tra i due livelli di dreni misurata sul piano campagna; c) efficienza media a regime; c) fattore tempo T_{50} ; d) fattore tempo T_{90} (Desideri et al., 1997).	53

Figura 2.19: Incremento del fattore di sicurezza per un singolo livello di dreni (Kenney, 1977).	54
Figura 2.20: Soluzioni di Novellier (1981) per un livello di dreni installato al piede di un pendio.	55
Figura 2.21: schema di progettazione per il sistema di pozzi di medio diametro RODREN.	57
Figura 2.22: schema geometrico utilizzato per il calcolo della portata emungibile da un pozzo in falda freatica.	58
Figura 2.23: schema di intervento con pozzi drenanti (Aloi et al., 2012).	59
Figura 2.24: schema di sezione drenante equivalente.	60
Figura 2.25: schema longitudinale e condizioni al contorno considerato da Aloi (2012).	61
Figura 2.26: analisi in pianta per il calcolo di u^* .	61
Figura 2.27: abachi per il progetto di pozzi drenanti (Aloi 2012).	62
Figura 2.28: efficienza calcolata sulla superficie piana a 15 m di profondità, al variare dell'interasse fra i pozzi, in funzione di: a) volume scavato per la realizzazione del pozzo rispetto al volume scavato per la trincea; b) superficie drenante del pozzo rispetto alla trincea. (Aloi, Pirone, Urciuoli, 2013).	63
Figura 2.29: schema pratico per il progetto di trincee con gli abachi di Desideri et al (1997).	65
Figura 3.1: significato geometrico della formula alle differenze centrali.	68
Figura 3.2: significato geometrico della formula alle differenze in avanti.	69
Figura 3.3: significato geometrico della formula alle differenze all'indietro.	70
Figura 3.4: significato geometrico dell'approssimazione della derivata seconda.	70
Figura 3.5: schema di calcolo del Metodo di Eulero Esplicito 1D.	73
Figura 3.6: schema di calcolo del Metodo di Eulero Esplicito 3D.	75
Figura 3.7: Sistema reticolare di pozzi: a) Geometria 3D. b) Dominio di riferimento. c) Pianta. d) Sezione longitudinale.	77
Figura 3.8: regioni del dominio a differente discretizzazione utilizzate per il calcolo: sezione nel piano x-y.	80
Figura 3.9: condizioni iniziale $h=h_0$: a) vettori filtrazione paralleli al piano campagna; b) contorni di quota piezometrica.	80
Figura 3.10: condizioni al contorno: a) piano passante per i pozzi; b) piano di simmetria interfila; c) piano campagna, superficie dei pozzi, substrato inferiore; d) superfici di monte e di valle.	81
Figura 3.11: schemi di riferimento per il listato dei comandi.	82
Figura 3.12: fase di inserimento dei parametri di input.	83
Figura 3.13: definizione dei vettori geometrici e delle relative discretizzazioni.	83
Figura 3.14: adimensionalizzazione dei parametri.	84
Figura 3.15: calcolo della dimensione dell'intervallo temporale e verifica della condizione di stabilità.	84
Figura 3.16: inizializzazione del codice: generazione dei vettori e delle coordinate per il calcolo.	85

Figura 3.17: a) singolo elemento della matrice h ; b) sottostruttura monodimensionale con indici corrispondenti a quelli del vettore x . _____	86
Figura 3.18: doppio ciclo for per l'assemblaggio della matrice delle condizioni iniziali. ____	86
Figura 3.19: matrici delle condizioni al contorno per i bordi sui quali si applica una condizione di Dirichlet. _____	87
Figura 3.20: ciclo per la determinazione dei punti appartenenti ai pozzi. _____	88
Figura 3.21: a) schema tridimensionale della matrice h in cui sono evidenziate una regione (azzurro), un piano di interfaccia tra due regioni (arancio) e un segmento di interfaccia tra quattro regioni (verde); b) nomenclatura assegnata alle varie regioni. _____	89
Figura 3.22: ciclo FDM: fase di aggiornamento della matrice h . _____	90
Figura 3.23: ripristino delle condizioni al contorno e di drenaggio. _____	91
Figura 3.24: operazioni di calcolo dell'efficienza idraulica. _____	91
Figura 3.25: salvataggio dei dati della matrice h . _____	92
Figura 3.26: tipico andamento dell'efficienza nel tempo (inteso come fattore tempo) su una generica superficie. _____	93
Figura 3.27: pressioni neutre su una superficie passante per la base dei pozzi. _____	93
Figura 3.28: tipico errore di calcolo dovuto al mancato rispetto della condizione di stabilità. _____	94
Figura 3.29: confronto tra il modello analitico (curve continue) e numerico (punti): a) sezione del cilindro indefinito considerato da Peng e Carslaw (monodimensionale); b) dominio considerato nel modello numerico; c) confronto dei risultati ottenuti con quelli ottenuti da Peng; d) confronto dei risultati ottenuti con Carslaw. A diverse curve corrispondono diversi istanti di tempo. _____	96
Figura 3.30: confronto tra trincee 2D (Desideri et al, 1997) e 3D: schema analizzato. ____	97
Figura 3.31: confronto tra trincee 2D (Desideri et al., 1997) e 3D: a) efficienza in regime stazionario; b) fattore di tempo T_{90} . _____	97
Figura 4.1: geometria del sistema di pozzi drenanti analizzato e rappresentazione grafica delle grandezze geometriche. _____	99
Figura 4.2: andamento dell'efficienza in funzione del rapporto i/s (dati in tabella 4.1). ____	100
Figura 4.3: andamento dell'efficienza in funzione della profondità della superficie considerata D , per diversi angoli di inclinazione del pendio α (dati in tabella 4.2). _____	102
Figura 4.4: abachi per il progetto di sistemi di pozzi drenanti a rete con maglie quadrate. _	105
Figura 4.5: fattore di tempo T_{90} per la stima dei tempi di ingresso in esercizio del sistema di pozzi drenanti a maglie quadrate. _____	109
Figura 5.1: condizioni al contorno modificate per l'analisi dell'effetto dei pozzi sulle fluttuazioni stagionali delle pressioni neutre nel sottosuolo. _____	111
Figura 5.2: ripristino delle condizioni sui bordi che delimitano il dominio. _____	112
Figura 5.3: schema di riferimento per la condizione da assegnare nei punti drenanti. ____	113

Figura 5.4: generazione della matrice ausiliaria MXpalo.	114
Figura 5.5: schema delle matrici ausiliarie contenenti, per i punti evidenziati, gli indici dei punti stessi: a) matrice MXpalo; b) matrice Mxpalo; c) matrice Mxintorno; d) schema della matrice hintornopalo contenente tutti termini nulli ad eccezione di valori unitari sui punti evidenziati in azzurro.	114
Figura 5.6: generazione delle matrici ausiliarie Mxpalo e Mxintornopalo.	115
Figura 5.7: ciclo FDM fittizio per la generazione della matrice ausiliaria hintornopalo .	115
Figura 5.8: ripristino della condizione (superficie di filtrazione) nei punti drenanti.	116
Figura 5.9: a) valori della correzione da applicare ad h al generico passo di calcolo (slice con il piano $y=0$ della matrice gfiltr); b) pressioni neutre alla fine del generico passo di calcolo (slice con il piano $y=0$ della matrice u).	117
Figura 5.10: evoluzione delle pressioni neutre medie a differenti profondità.	118
Figura 5.11: involuppi dei valori massimi, minimi e medi delle pressioni neutre in funzione della profondità in presenza di pozzi (curve continue) e in assenza di pozzi (curve tratteggiate). Parametri fissi: $A=2$ m, $H=15$ m, $H_0=10$ m, $d=1$ m, $i=s=12,5$ m, $\alpha=10^\circ$. Parametri variabili: $c_v=10^{-5}$ m ² /s (grafico a sinistra), $c_v=5 \cdot 10^{-6}$ m ² /s (grafico al centro), $c_v=10^{-6}$ m ² /s (grafico a destra).	120
Figura 5.12: parametri fissi: $A=2$ m, $H=15$ m, $H_0=10$ m, $d=1$ m, $i=s=7,5$ m, $\alpha=10^\circ$. Parametri variabili: $c_v=10^{-5}$ m ² /s (grafico a sinistra), $c_v=5 \cdot 10^{-6}$ m ² /s (grafico al centro), $c_v=10^{-6}$ m ² /s (grafico a destra).	121
Figura 5.13 Parametri fissi: $A=4$ m, $H=15$ m, $H_0=10$ m, $d=1$ m, $i=s=12,5$ m $\alpha=10^\circ$. Parametri variabili: $c_v=10^{-5}$ m ² /s (grafico a sinistra), $c_v=5 \cdot 10^{-6}$ m ² /s (grafico al centro), $c_v=10^{-6}$ m ² /s (grafico a destra).	121
Figura 5.14: parametri fissi: $A=4$ m, $H=15$ m, $H_0=10$ m, $d=1$ m, $i=s=7,5$ m, $\alpha=10^\circ$. Parametri variabili: $c_v=10^{-5}$ m ² /s (grafico a sinistra), $c_v=5 \cdot 10^{-6}$ m ² /s (grafico al centro), $c_v=10^{-6}$ m ² /s (grafico a destra).	122
Figura 5.15: confronto tra analisi con condizione variabile e lama d'acqua al piano campagna: a) massimi valori di pressione prima e dopo l'ingresso in esercizio dei pozzi; b) efficienze idrauliche a regime.	123
Figura 6.1: schermata di installazione del Matlab Compiler Runtime.	126
Figura 6.2: schermata iniziale del software DreNando.	127
Figura 6.3: schermata di input per le trincee drenanti.	128
Figura 6.4: schermata di input per il sistema a rete di pozzi.	129
Figura 6.5: schermata di input per il pozzo isolato.	130
Figura 6.6 schermata di input per il sistema di aste a raggiera.	131
Figura 6.7: esempio di apparente blocco del software.	131
Figura 6.8: schermata di input per il sistema di aste parallele.	132
Figura 6.9: esempio di output "pressioni neutre" per le trincee drenanti.	133
Figura 6.10: esempio di output "pressioni neutre sulla superficie di scorrimento" per le trincee drenanti.	134
Figura 6.11: Tabella dei dati relativi alle pressioni neutre sulla superficie di scorrimento.	134

Figura 6.12: esempio di output “pressioni neutre nel tempo” per le trincee drenanti.	135
Figura 6.13: Tabella dei dati relativi all’evoluzione delle pressioni neutre nel tempo.	135
Figura 6.14: esempio di output “flusso” per le trincee drenanti.	136
Figura 6.15: esempio di output “superficie piezometrica” per la rete di pozzi drenanti.	137
Figura 6.16: Tabella dei dati relativi alle pressioni neutre sulla superficie di scorrimento.	137
Figura 6.17: esempio di output “slice u” per la rete di pozzi drenanti.	138
Figura 6.18: esempio di output “involuppi pressione-profondità” per la rete di pozzi drenanti.	138
Figura 6.19: esempio di output “involuppi efficienza-profondità” per la rete di pozzi drenanti.	139
Figura 6.20: esempio di output “efficienza vs tempo” per la rete di pozzi drenanti.	140
Figura 6.21: esempio di output “cedimenti al piano campagna” per la rete di pozzi drenanti.	140
Figura 6.22: esempio di output “superficie piezometrica” per il pozzo isolato.	141
Figura 6.23: esempio di output “slice u” per il pozzo isolato.	142
Figura 6.24: esempio di output “efficienza vs tempo” per il pozzo isolato.	143
Figura 6.25: esempio di output “superficie piezometrica” per le aste a raggiera.	143
Figura 6.26: esempio di output “slice u” per le aste a raggiera.	144
Figura 6.27: esempio di output “efficienza vs tempo” per le aste drenanti.	145
Figura 6.28: esempio di output “superficie piezometrica” per le aste a raggiera.	145
Figura 6.29: esempio di output “slice u” per le aste a raggiera.	146
Figura 6.30: esempio di output “efficienza vs tempo” per le aste drenanti.	147

Indice delle tabelle

Tabella 2.1: equazione della consolidazione e parametri per i casi 1D e 2D. _____	36
Tabella 2.2: letteratura di riferimento per l'analisi del funzionamento di trincee drenanti. ____	40
Tabella 2.3: letteratura di riferimento per l'analisi del funzionamento di dreni sub- orizzontali. _____	49
Tabella 2.4: confronto tra i possibili approcci per il dimensionamento di trincee con abachi. 66	
Tabella 3.1: analisi per la calibrazione della lunghezza L del dominio. _____	78
Tabella 3.2: analisi per la calibrazione della mesh. _____	79
Tabella 3.3: dati geometrici utilizzati nelle analisi di validazione. _____	97
Tabella 3.4: condizione iniziale e condizioni al contorno utilizzate nelle analisi di validazione. _____	98
Tabella 4.1: dati utilizzati nelle analisi per valutare l'effetto forma di una rete di pozzi. ____	100
Tabella 4.2: dati utilizzati nelle analisi per valutare l'effetto dell'inclinazione nel pendio sull'efficienza del sistema di pozzi. _____	101
Tabella 4.3: geometria utilizzata nelle analisi parametriche. _____	102
Tabella 4.4: condizioni iniziali e condizioni al contorno utilizzate nelle analisi parametriche. _____	103
Tabella 5.1: valori dei parametri utilizzati nelle analisi con condizione al contorno variabile. 119	

Introduzione

La presenza di numerose ed estese aree a rischio di frana pone, su gran parte del territorio italiano e mondiale, considerevoli problemi di sicurezza, nonché limitazioni allo sviluppo urbanistico, industriale e, più in generale, economico delle comunità. Le perdite economiche causate indirettamente dal mancato utilizzo di aree pericolose, che potrebbero essere destinate a diverse attività produttive, hanno un impatto confrontabile con i danni direttamente causati dalle frane a strutture e infrastrutture e, nei casi più tragici, alle persone.

In generale, le varie strategie di prevenzione e salvaguardia delle aree soggette a rischio di frana possono essere ricondotte a due categorie fondamentali, che riducono la probabilità che un evento catastrofico si verifichi, mitigandone la pericolosità:

- interventi attivi, che stabilizzano il corpo di frana abbattendo la probabilità di accadimento di un evento, come: drenaggi, opere di sostegno, rinforzi del terreno, rimodellamenti del pendio, ancoraggi;
- interventi passivi, che riducono il danno e impediscono al fenomeno franoso di propagarsi, come: barriere paramassi, vasche di intercettazione del fango, restrizioni sull'edificabilità.

Il presente lavoro di tesi si inserisce in questo contesto con l'obiettivo di dare un contributo alla comunità tecnico-scientifica per la risoluzione dei problemi di stabilità dei pendii. La lente d'ingrandimento della ricerca è stata posta sugli interventi attivi ed ancor più nel dettaglio sulle opere di drenaggio. Esse rappresentano la soluzione più naturale e di minor impatto ambientale per tipologie di frane lente come scivolamenti e colate in terreni a grana fine. I fattori di innesco di queste frane sono, infatti, quasi sempre connessi al regime di pressioni neutre che agisce alla profondità della superficie di scorrimento. Proprio la riduzione delle pressioni neutre nel terreno consente di incrementare la resistenza disponibile senza ricorrere ad invadenti opere strutturali. Il limite storico dei drenaggi risiede nei problemi tecnici ed economici che caratterizzano gli interventi ad elevate profondità. Da questo punto di vista, le opere di drenaggio che garantiscono i maggiori benefici sono i pozzi drenanti di piccolo e medio diametro. I vantaggi che tale soluzione offre sono da ricercarsi: 1) nella capacità di raggiungere agevolmente profondità elevate, grazie a tecniche di perforazione consolidate e 2) nell'elevata efficienza di lavoro rispetto, ad esempio, alle trincee drenanti che sono inutilmente ridondanti. Purtroppo, dopo una prima fase di largo utilizzo, l'affermazione dei pozzi drenanti ha subito un forte ridimensionamento a causa di problemi legati alla sicurezza delle maestranze. La sicurezza ha fortemente penalizzato i brevetti sviluppati in passato, i quali prevedevano che fosse calato un operatore in un cavo troppo angusto per permettere una rapida evacuazione. Gli sviluppi tecnologici degli ultimi anni consentono di risolvere questi problemi, grazie alle tecniche HDD (horizontal directional

drilling), che rappresentano un valido supporto tecnologico per la realizzazione dello scarico di fondo e che hanno risvegliato l'interesse dei tecnici verso l'utilizzo dei pozzi drenanti.

I pozzi drenanti stanno tornando ad essere una valida alternativa per la stabilizzazione delle frane profonde anche per altre opportunità che lo sviluppo tecnologico consente:

- l'utilizzo di tecnologie di comprovata affidabilità come la realizzazione dello scavo attraverso trivelle permette il raggiungimento di superfici di scorrimento molto profonde, cosa che invece diventa complessa con altre tecnologie;
- l'utilizzo del geo-composito drenante disposto lungo il contorno del cavo permette di riutilizzare il materiale scavato in sito come riempimento, risparmiando notevolmente sui costi di trasporto a discarica del materiale estratto dalla perforazione;
- la possibilità di realizzare un'armatura consistente e di utilizzare calcestruzzo (sempre all'interno di un cilindro di geo-composito drenante) lascia spazio all'ipotesi di poter realizzare un intervento ibrido tra un'opera di drenaggio ed un'opera di sostegno, riducendo ulteriormente i costi quando vi sia bisogno di un accoppiamento tra le due tipologie;
- l'utilizzo di un sistema discreto permette il superamento di eventuali vincoli progettuali che un'opera continua non potrebbe rispettare, come attraversamento di strade, condotte ecc.

Attualmente, il ritardo che questa tecnologia accusa, nei confronti delle altre opere di drenaggio, è rappresentato dall'esiguo numero di trattazioni scientifiche a riguardo, e dall'assenza di strumenti semplici per il dimensionamento dei sistemi. Tale scarso interesse della comunità scientifica verso questo tipo di opere è logica conseguenza del fatto che il loro sviluppo è rimasto fermo per diversi anni.

Proprio da queste considerazioni, basate su un'analisi preliminare della letteratura, nasce l'interesse verso uno studio approfondito sui pozzi drenanti. L'obiettivo di partenza è duplice. Da un lato, l'approccio scientifico, ovvero analizzare il comportamento del sistema per comprendere gli aspetti idrodinamici del problema e giungere ad un'ottimizzazione della progettazione, dall'altro, l'approccio pratico, ovvero quello di fornire alla comunità tecnica degli strumenti semplici ed allineati a quelli già esistenti per altre opere di drenaggio.

Il raggiungimento di tali obiettivi non può prescindere dalla modellazione numerica del problema e da un'attenta analisi dei risultati. Un simile approccio è possibile attraverso diversi codici di calcolo commerciali. Tuttavia, in questo modo sarebbe garantito il raggiungimento del primo obiettivo ma solo parzialmente del secondo. L'unico modo per riuscire a soddisfare contemporaneamente gli obiettivi ambiti è stato quello di realizzare un codice di calcolo autonomo e implementarlo in un software eseguibile, liberamente distribuibile e dotato di una semplice interfaccia grafica.

Lo sviluppo della tesi segue perfettamente il filo logico della ricerca. Nei primi due capitoli è riportata un'ampia analisi della letteratura esistente sui drenaggi. In particolare una descrizione di tutte le opere drenanti attualmente utilizzate nella pratica tecnica, sia dal punto di vista tecnologico (**capitolo 1**), che dal punto di vista del dimensionamento (**capitolo 2**). Tale parte rappresenta la fase di studio preliminare che ha indirizzato il lavoro verso gli obiettivi illustrati.

Il **capitolo 3** rappresenta il cuore della ricerca ed illustra, in maniera dettagliata, la modellazione del sistema di pozzi drenanti, per l'analisi con la condizione di lama d'acqua a piano campagna. Nello specifico vengono presentate sia le basi teoriche del problema sia la trattazione numerica, fino alla validazione finale del codice di calcolo.

Nel **capitolo 4** vengono illustrati e commentati i risultati di uno studio parametrico, rappresentati sotto forma di abachi adimensionali, che permettono il dimensionamento di un sistema ottimizzato di pozzi drenanti.

Nel **capitolo 5** è riportato uno studio sull'interazione del sistema di pozzi con le fluttuazioni stagionali delle pressioni neutre nel sottosuolo, nonché la descrizione delle modifiche apportate al codice per tenere conto di tale situazione.

Infine nel **capitolo 6** viene descritta l'interfaccia grafica del software e tutte le funzioni che in esso sono implementate.

1 Tecnologia dei drenaggi

1.1 Introduzione

L'ampia diffusione delle opere di drenaggio per la stabilizzazione dei pendii è dovuta alla loro particolare azione che produce un incremento delle forze resistenti necessarie a garantire l'equilibrio della massa instabile, attingendo direttamente (e solamente) alle risorse intrinseche del terreno (la resistenza). Infatti se l'azione dei drenaggi è sufficiente non vi è necessità di introdurre forze stabilizzanti esterne mediante la costruzione di opere strutturali. In tal modo, almeno nella maggioranza dei casi, si perseguono anche un risparmio di risorse economiche ed una riduzione dell'impatto ambientale dell'intervento di stabilizzazione.

Un sistema di drenaggio è costituito da un insieme di aste, pozzi, trincee, gallerie: elementi vuoti o riempiti di materiale di elevata permeabilità, nei quali grazie ad un recapito verso l'esterno del pendio (si parla in tal caso di drenaggi a gravità) è possibile il controllo della pressione del liquido interstiziale, che viene in tal modo mantenuta al valore atmosferico. Il recapito di cui si è detto consente anche l'allontanamento dell'acqua drenata dal terreno. Sono possibili altre soluzioni tecnologiche che prevedono l'estrazione dell'acqua dal drenaggio con sistemi di pompe.

L'efficienza di un sistema di drenaggio in generale non dipende dalla quantità d'acqua allontanata, ma dalle variazioni del regime delle pressioni neutre che il sistema è in grado di produrre. Nei terreni permeabili, la portata smaltita dai dreni è elevata e, se maggiore rispetto a quella di alimentazione dalla superficie o da altri contorni del volume esaminato, determina l'abbassamento del livello di falda ed il prosciugamento dei terreni al di sopra del pelo libero. Nei litotipi di bassa permeabilità, invece, la portata estratta dai dreni è modesta ed i drenaggi inducono principalmente una rotazione del vettore filtrazione, con un modesto o trascurabile abbassamento del pelo libero della falda. Ciò non pregiudica l'utilità dei drenaggi poiché la loro efficacia si misura attraverso la riduzione delle pressioni neutre, legata alla variazione del regime di filtrazione.

Nella pratica attuale, la riduzione delle pressioni neutre all'interno di un pendio può essere ottenuta mediante differenti tipologie di sistemi drenanti. Gli aspetti che indirizzano all'uso di una tecnologia drenante piuttosto che ad un'altra sono: morfologia, litologia, tipo di cinematismo e profondità delle superfici di scorrimento.

I sistemi di drenaggio possono essere suddivisi in:

- trincee superficiali (con profondità massime di 5-6 metri), riempite con: materiale a grana grossa, avvolto in teli di geotessile per evitare l'intasamento del dreno da parte delle particelle fini trasportate dall'acqua; oppure con pannelli drenanti prefabbricati in ciottoli di polistirolo espanso o di polistirene avvolti in geotessile; o ancora, infine, con calcestruzzo cellulare;

- trincee profonde, che possono raggiungere profondità fino a 20 m (eccezionalmente 30 m), scavate con benna mordente e riempite con materiale in sito avvolto da un geo-composito, o con pali secanti riempiti di calcestruzzo cellulare;
- aste drenanti sub-orizzontali, consistenti in tubi di PVC micro fessurato avvolti in garze di geotessile ed inseriti in fori trivellati, realizzate con tecniche tradizionali mediante perforazione direzionale (HHD);
- pozzi verticali:
 - di piccolo diametro, dai quali l'acqua viene estratta con pompe elettromeccaniche, elettropneumatiche, oppure attraverso sifoni;
 - di medio diametro, dai quali l'acqua fuoriesce per gravità attraverso dei collettori disposti alla base;
 - di grande diametro, attrezzati con una o più batterie di aste drenanti, e dotati di sistemi di condotte per consentire lo smaltimento dell'acqua;
- gallerie, con o senza aste drenanti.

Mentre alcune tecniche sono oramai in disuso, come i pozzi isolati con pompe emungenti, altre tecnologie si stanno diffondendo sul mercato per la rapida evoluzione tecnologica e per i vantaggi che offrono, soprattutto se utilizzate in sinergia con altre opere. Nei paragrafi che seguono verranno discusse le tecniche attualmente più utilizzate per il drenaggio dei pendii.

1.2 Trincee drenanti superficiali

Le trincee drenanti superficiali vengono utilizzate per stabilizzare scivolamenti traslazionali o rotazionali che si verificano tipicamente in terreni a grana fine fortemente alterati. Le *trincee principali* sono in genere disposte parallelamente fra di loro all'interno del corpo di frana, nella direzione di massima pendenza (figura 1.1).

Spesso esse presentano dei rami laterali (eventualmente di minore profondità), che ne determinano in pianta la tipica forma ad Y. Questi *rami* sono detti *secondari*. Talvolta si adottano accorgimenti per ridurre l'impatto visivo dell'intervento (figura 1.2). Talvolta sono realizzate a monte del coronamento della frana per impedire che le acque sotterranee affluiscano nella zona in movimento.

Le trincee sono generalmente realizzate con un escavatore semplice e possono raggiungere profondità massime di poco superiori ai 5 m (figura 1.3); nel caso si ricorra ad attrezzature speciali, come macchine con braccio di lunghezza superiore a quelle ordinarie (figura 1.4), si possono raggiungere profondità superiori. La larghezza della trincea dipende dal tipo di escavatore utilizzato e può variare da 0,5 a 1,0 m. In zone aperte le trincee possono essere realizzate *a pareti inclinate*, la cui acclività dipende da considerazioni sulla stabilità dello scavo, secondo quanto teoria ed esperienza pratica suggeriscono.

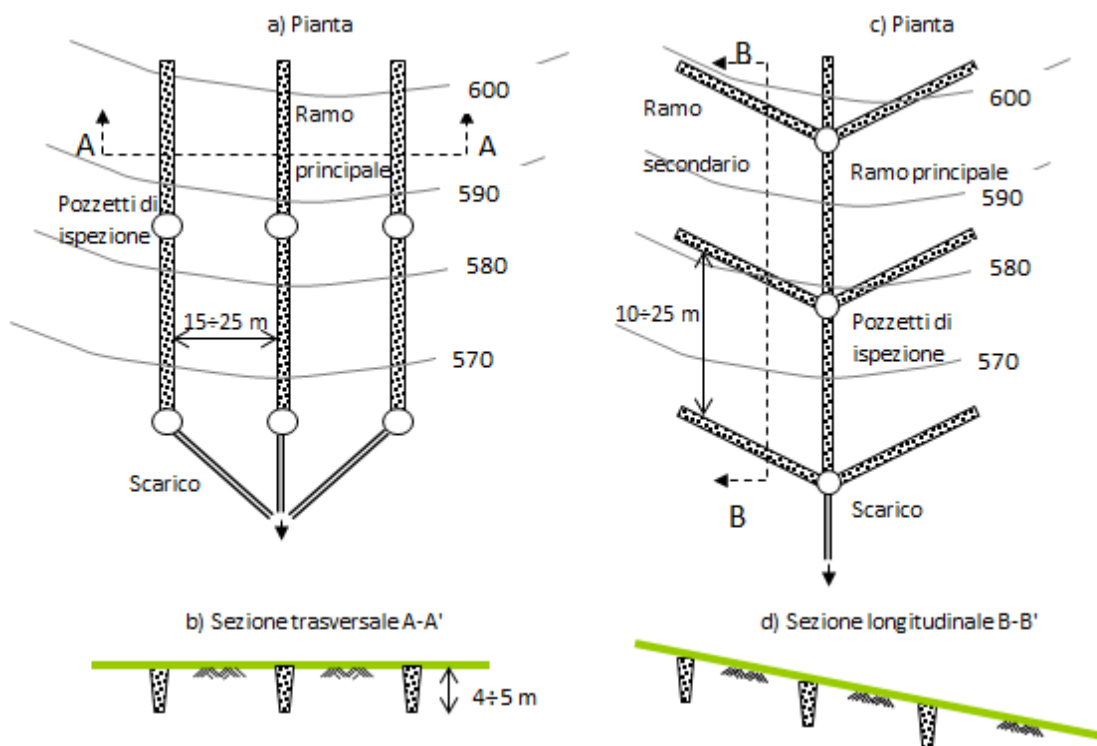


Figura 1.1: trincea superficiale con soli rami principali: a) pianta; b) sezione trasversale (lungo curve di livello). Trincea superficiale con rami principali e secondari: c) pianta; d) sezione longitudinale.

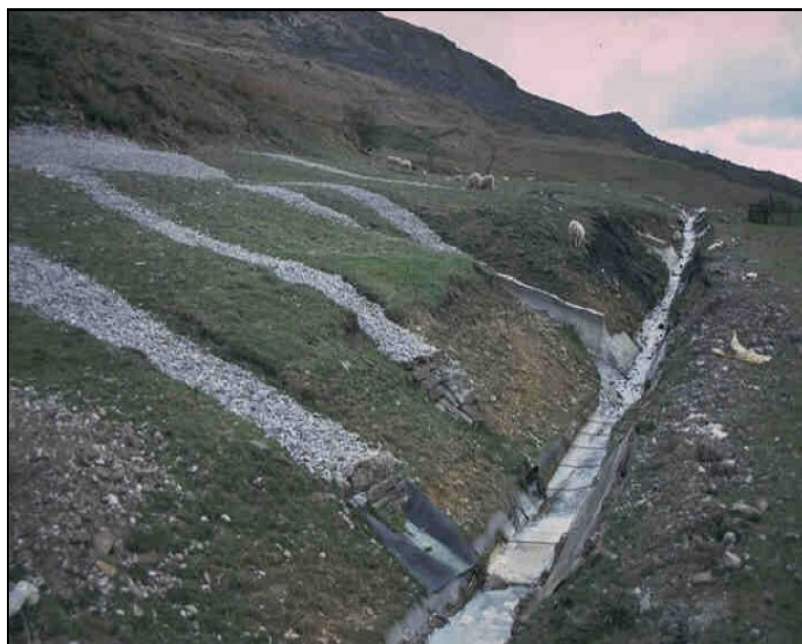


Figura 1.2: trincee superficiali con strato superiore ricoperto di pietre per ridurre l'impatto ambientale.



Figura 1.3: escavatore utilizzato per trincee fino ad una profondità di circa 5 m dal suolo.

Se lo spazio non è sufficiente, le pareti della trincea saranno verticali e dovranno essere adeguatamente sostenute (figura 1.4). Linee guida sulla progettazione del sostegno laterale allo scavo sono date in molte pubblicazioni, tra cui le BS 6031:1981 (BSI 1981); in ogni caso, i problemi di instabilità delle trincee in terreni a grana fine possono essere ridotti scavando per brevi tratti e riempiendo lo scavo entro breve tempo, sfruttando il comportamento non drenato dei terreni.

La trincea viene riempita di materiale granulare e sul fondo viene alloggiato un tubo di convogliamento perforato sul lato superiore del diametro di 100 – 200 mm, avvolto in una garza di geotessile per evitare l'occlusione dei fori (figura 1.5). Questa caratteristica esecutiva garantisce che la *capacità drenante* dell'intervento non venga compromessa, ovvero che non si formi un battente di acqua che limiterebbe lo smaltimento dell'acqua drenata.

Il materiale di riempimento della trincea è in genere costituito da sabbia e ghiaia di granulometria adeguata per soddisfare i requisiti dei filtri, evitando l'ingresso nel drenaggio di materiale fine ed il progressivo intasamento dell'opera. E' possibile prescindere dai requisiti dei filtri ed impiegare solo materiali a grana grossa (ghiaia, pezzame di pietra) se le pareti e la base della trincea vengono rivestite di un filtro di geotessile.

Sempre più di frequente si ricorre all'uso di corpi drenanti prefabbricati, in materiale leggero, quali pannelli di polistirene già avvolti in un telo di geotessile e contenuti in una rete metallica (figura 1.6), che vengono assemblati fuori dello scavo e calati all'interno della trincea. Questo accorgimento evita che le maestranze operino all'interno del foro e, quindi, consente maggiore sicurezza in cantiere; diversamente bisognerebbe mettere in atto misure impegnative sotto il profilo dei tempi di lavorazione e dei costi (posa in opera di puntelli, blindaggi).

La parte superiore della trincea è in genere costituita da uno strato impermeabile di argilla compattata per evitare l'infiltrazione delle acque di ruscellamento, che dovrebbero essere raccolte e smaltite indipendentemente da quelle profonde, attraverso un sistema di canalette superficiali.

La copertura impermeabile deve avere uno spessore minimo di 0,5 m, larghezza pari a quella della trincea, e deve essere compattata in strati. Essa va infine protetta da fenomeni di erosione superficiale con vegetazione a piano campagna.

Le trincee dovrebbero essere costruite a partire dal punto a quota inferiore nella zona da drenare (punto di recapito delle acque raccolte): in tale modo è possibile allontanare l'acqua durante la fase di costruzione e la funzione drenante si esplica sin dall'inizio.



Figura 1.4: scavo con pareti verticali e blindaggio.

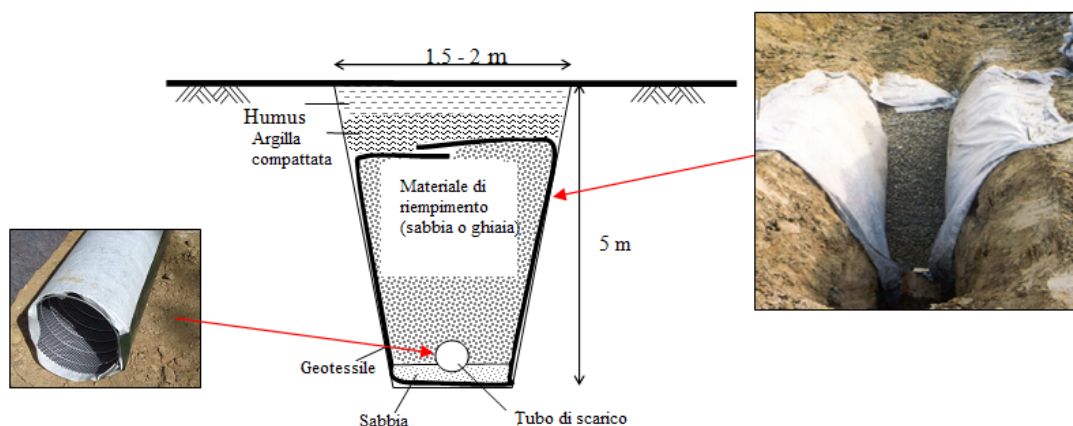


Figura 1.5: schema di una trincea superficiale: particolari di realizzazione.



Figura 1.6: pannelli di polistirene avvolti in geotessile.

Devono essere installati pozzetti di ispezione che intercettino le trincee, per consentire:

- il monitoraggio della condizione di funzionamento del sistema di drenaggio, ed eventualmente la misura del flusso;
- la manutenzione ed il lavaggio del tubo forato di fondo.

La riduzione della pressione interstiziale varia lungo la sezione longitudinale del pendio. La massima riduzione avviene ad una distanza dalla sezione di inizio della trincea pari a $3\div 4$ volte l'interasse tra le trincee. Pertanto, soprattutto verso monte, la lunghezza della trincea viene solitamente estesa per un tratto di $3\div 4$ volte l'interasse all'esterno dell'area interessata dalla frana in modo che essa sia pienamente efficiente all'interno del corpo di frana.

1.3 Trincee drenanti profonde

Le trincee drenanti profonde possono raggiungere i $25\div 30$ m dal piano campagna e si utilizzano, quindi, nel caso di frane di spessore relativamente elevato. La pianta schematica di tale intervento, con rami principali e secondari, è sostanzialmente simile a quella delle trincee superficiali (figura 1.7). La differenza rispetto a queste ultime risiede essenzialmente nella tecnica di scavo e nelle attrezzature utilizzate; in genere si ricorre all'uso di benna mordente (figura 1.8), adatta a tutti gli scavi profondi.

La verticalità delle pareti imposta dalla tecnica di scavo crea in questo caso, a differenza delle trincee superficiali, un ulteriore problema di stabilità per il foro. Dunque, esso viene sostenuto ricorrendo all'uso di fanghi polimerici biodegradabili, preferiti ai fanghi bentonitici poiché questi ultimi impermeabilizzerebbero definitivamente i contorni della trincea; l'uso ed il riciclo dei fanghi polimerici comporta un incremento dei costi di costruzione.

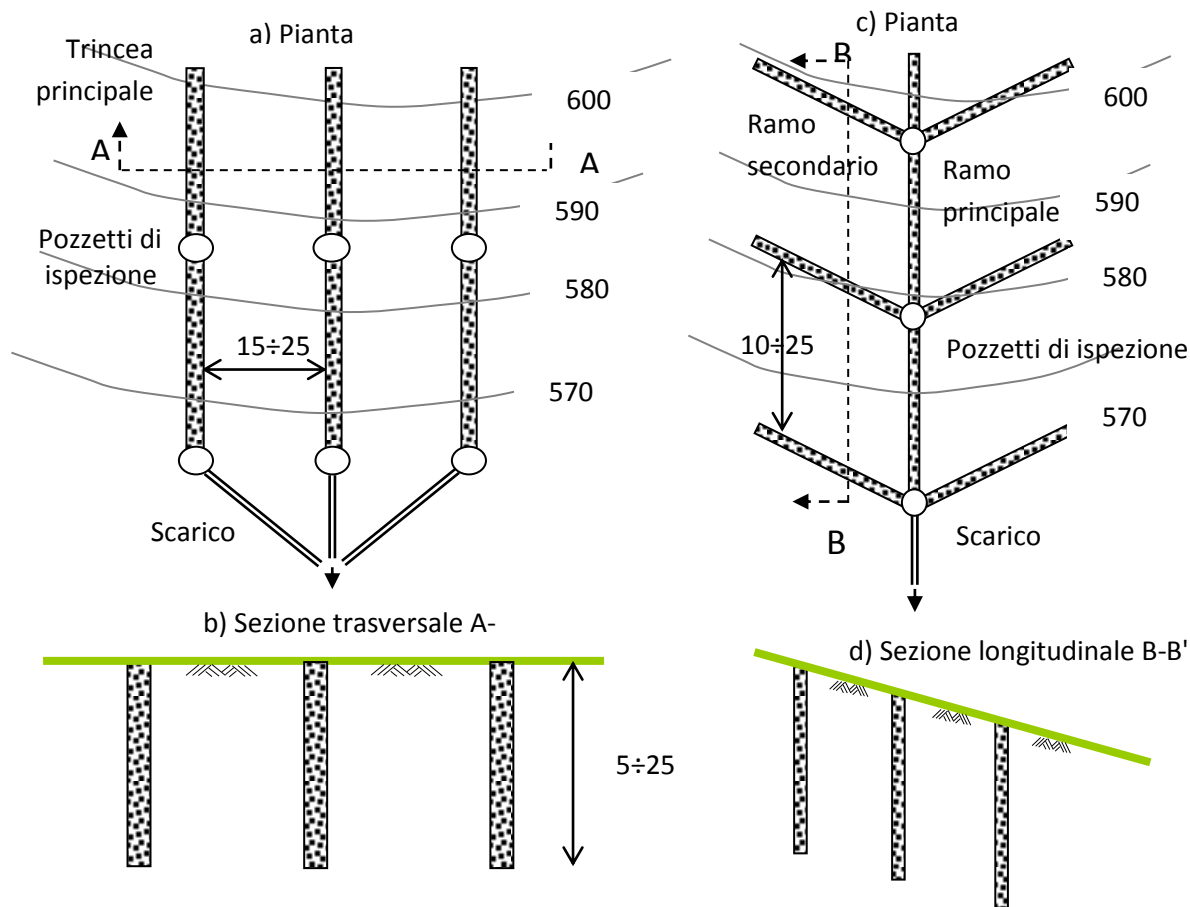


Figura 1.7: trincee profonde con soli rami principali: a) pianta, b) sezione trasversale. Trincee superficiali, con rami principali e secondari: c) pianta, d) sezione longitudinale.



Figura 1.8: benna a valve utilizzata per trincee profonde.

Inoltre, a causa della elevata profondità, la posa in opera del tubo di scarico risulta molto complessa; nondimeno, il volume dei materiali necessari per riempire le trincee è rilevante. Tutte queste difficoltà operative sono state uno stimolo a sviluppare continuamente nuove tecnologie di realizzazione per questa tipologia di opere, come le gabbie drenanti preassemblate, che vengono calate direttamente all'interno dello scavo.

Altri tipi sono:

- la *trincea stretta*, in cui si cala un geocomposito drenante (figura 1.9) con una superficie ad alta capacità di raccolta, ricoperta di terreno di riporto leggermente compattato. Si tratta di un geocomposito costituito da un'anima drenante, unita a due filtri di geotessile con una cavità alla base predisposta per il montaggio del tubo di raccolta. Le caratteristiche di questo sistema sono: ottima filtrazione, efficienza idraulica costante, volumi di scavo contenuti, riduzione del terreno da smaltire, riduzione totale di materiali inerti, e maggiore sicurezza in cantiere. Tutte queste caratteristiche rendono questo sistema di trincee profonde innovativo e competitivo rispetto al sistema di trincee tradizionali. La continuità verticale della trincea profonda è garantita dalla sovrapposizione dei geocompositi mediante semplici ed opportune accortezze di realizzazione (figura 1.10).



Figura 1.9: schema di trincee strette con geocomposito e tubi.

- le trincee profonde, realizzate con pannelli di calcestruzzo cellulare, composto da ghiaia ad alta permeabilità (10^{-1} m/s) e cemento con una buona resistenza a compressione. La tecnologia di scavo utilizzata è la stessa in uso per i diaframmi in calcestruzzo classici e permette, quindi, il raggiungimento di qualsiasi profondità. I pannelli di solito hanno le dimensioni in pianta di $0,8 \div 1$ m per $2,5 \div 3$ m e sono realizzati in alternanza (prima i dispari e poi i pari). Questo sistema può inoltre essere realizzato sostituendo i pannelli con pali secanti (figura 1.11), ma presenta lo svantaggio di una notevole lentezza di esecuzione.

Per quel che concerne la manutenzione ed il monitoraggio, valgono le stesse considerazioni fatte per i sistemi di drenaggio superficiali.

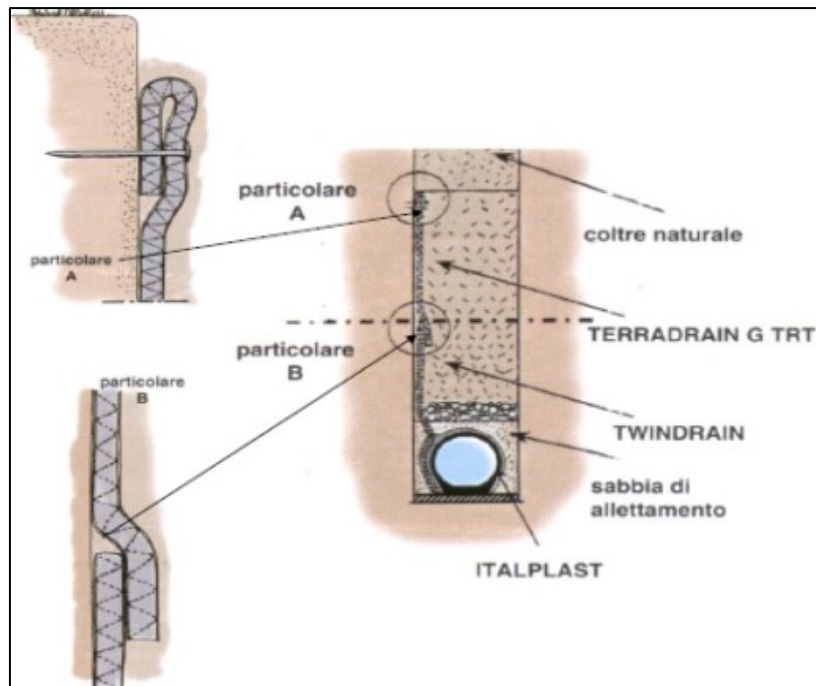


Figura 1.10: esempio di trincee strette con geocomposito.



Figura 1.11: tecnica di pali secanti: a) prima serie di pali, b) serie di pali pari.

1.4 Dreni sub-orizzontali

I dreni sub-orizzontali trovano il loro campo di applicazione nella stabilizzazione di pendii argillosi acclivi in frana e di colamenti con superfici di scivolamento piuttosto profonde. Sono costituiti da tubi in materiale plastico o (raramente) in acciaio micro-fessurati, rivestiti con geotessile con funzione anti-contaminante; vengono inseriti all'interno di fori trivellati del diametro di 40÷120 mm e di lunghezza fino a qualche centinaio di metri (figura 1.12). I tubi possono essere di tipo rigido, formati da più barre opportunamente giuntate, o di tipo flessibile, quando un unico pezzo viene ritagliato da un rotolo. I fori vengono realizzati con macchine di modesta potenza e modesto ingombro, e i tempi di installazione sono piuttosto ridotti: sino a 100 m al giorno.

Le aste tendono rapidamente a perdere efficienza nel tempo perché i tubi, a causa del loro modesto diametro, possono essere occlusi dai depositi di calcite, sali e ossidi di ferro. Per limitare questi fenomeni è necessario non far ristagnare l'acqua nei tubi e consentire l'evacuazione gravitativa delle acque drenate. A questo fine i dreni vengono realizzati in leggera pendenza ($4-5^\circ$) e, inoltre, va predisposto un piano di manutenzione che preveda il lavaggio periodico dei tubi con un getto di acqua ad alta pressione o con aria compressa. In assenza di manutenzione, la vita utile di un sistema di aste drenanti non supera i 15÷20 anni ma può essere molto più breve.

Un altro possibile inconveniente per questo tipo di drenaggi è la penetrazione di radici all'interno del tubo sfinestrato. Pertanto, in prossimità del piano di campagna, esso viene spesso protetto con un tubo di rivestimento esterno di PVC.

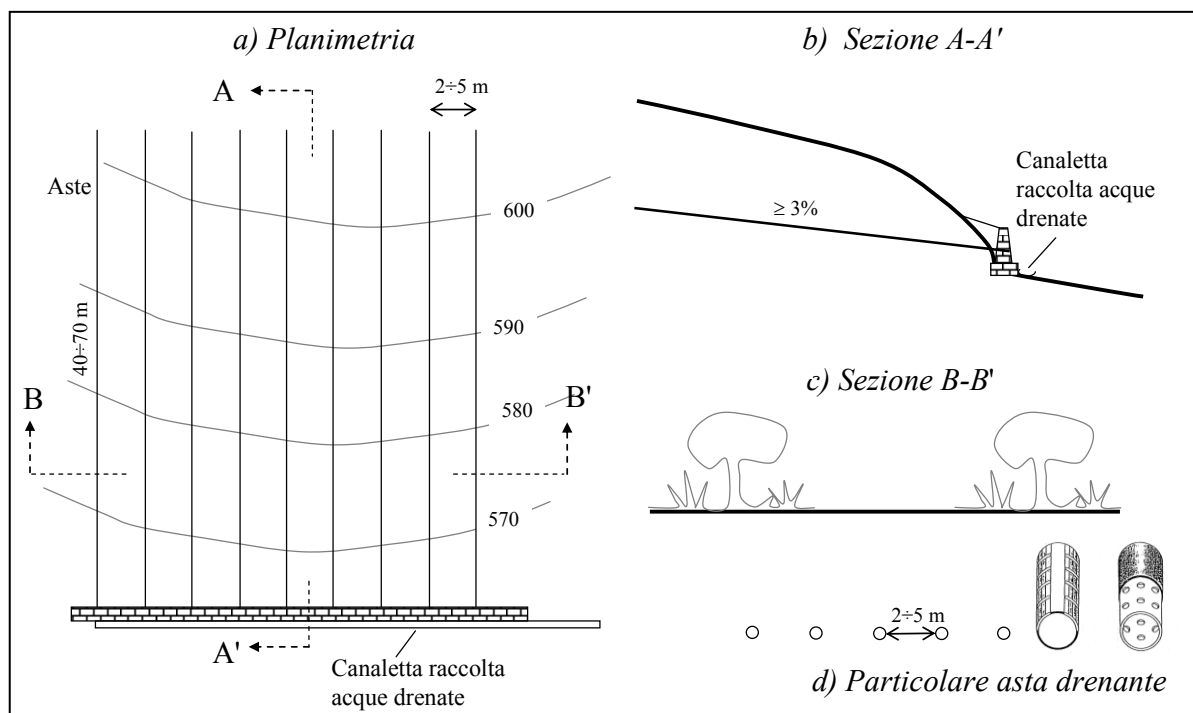


Figura 1.12: schema di intervento con aste drenanti

Dato che tutti i tipi di drenaggio sono interrati, essi non comportano un rilevante impatto sull'ambiente, anche se una progettazione ed un'esecuzione non corrette potrebbero avere ripercussioni negative sull'equilibrio delle acque sotterranee. Si pensi all'interferenza dei dreni con sorgenti limitrofe, ad esempio. In generale è necessario conoscere, almeno approssimativamente, il regime di falda, tramite piezometri, e la permeabilità dei vari orizzonti presenti nel versante da stabilizzare. E' indispensabile, infine, raccordare i dreni ad uno scolo naturale per gravità, controllando che lo sversamento delle acque raccolte non sia causa di fenomeni di instabilità a valle o di altri malfunzionamenti.

Le aste drenanti possono essere inserite non solo dalla superficie del pendio ma a partire da opere interrate, quali gallerie o pozzi drenanti, fungendo in questo caso da collettori di raccolta e di evacuazione delle acque per gravità dal terreno verso tali opere.

1.5 Pozzi

I pozzi sono necessari quando la profondità della falda o della superficie di scorrimento sono molto elevate, o quando il sottosuolo non è omogeneo, ma è costituito da strati di diversa permeabilità, tra i quali l'opera deve intercettare il più permeabile per essere più efficiente. Essi vengono essenzialmente distinti per le loro dimensioni in (figura 1.13):

- *pozzi di piccolo diametro* (< 800 mm);
- *pozzi di medio diametro* (1200 ÷ 1500 mm);
- *pozzi di grande diametro* (> 2 m).

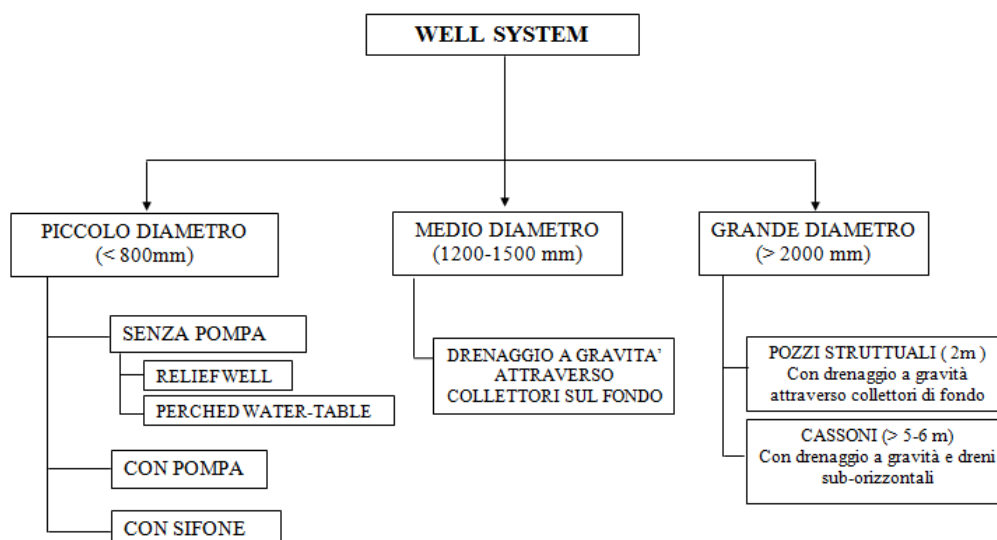


Figura 1.13: classificazione dei pozzi.

Oltre al diametro, un ulteriore elemento di classificazione è la tecnica di allontanamento dell'acqua drenata attraverso:

- *pompe elettriche,*
- *sifoni,*
- *scarico di fondo a gravità.*

1.5.1 Pozzi di piccolo diametro

Nel caso di pozzi di piccolo diametro il foro può essere praticato con differenti tecniche:

- *metodi di rotazione standard*, in cui una testa perforante penetra nel terreno, mentre un fluido organico biodegradabile (quindi non fanghi bentonitici, poiché impermeabilizzerebbero le pareti, vanificando l'effetto di drenaggio) viene pompato verso il basso per raffreddare e lubrificare l'attrezzo di perforazione, e riportare in superficie i detriti;
- *metodi di rotazione inversa*, che a differenza del caso precedente prevedono l'uso di un fluido di perforazione che viene aspirato, attraverso il tubo perforante, verso la superficie, per poi essere nuovamente immesso nel foro per gravità, dopo aver depositato i detriti;
- *tecnica di bailing&casing*, usata nelle sabbie o nei depositi non consolidati, in cui un tubo di rivestimento di acciaio viene inserito direttamente nel foro per stabilizzarne le pareti.

All'interno del foro viene inserito un tubo con una sezione sfinestrata, un filtro di sabbia disposto nell'intercapedine fra tubo e terreno, configurato in modo da evitare l'ingresso del materiale fine dall'acquifero all'interno del pozzo, una montante per la risalita di acqua in superficie, una valvola di non ritorno, un riempimento di calcestruzzo per occludere l'intercapedine al di sopra del filtro per evitare l'infiltrazione delle acque superficiali ed un chiusino in superficie per evitare atti di vandalismo. La dimensione del foro deve essere tale da garantire uno spessore di 10-15 cm per il filtro, e ne deve essere garantita la verticalità attraverso apparecchiature di centramento che inseriscono il tubo perfettamente "a piombo", in modo tale da consentire la continuità del filtro intorno alla sezione sfinestrata.

Il filtro viene posizionato attraverso una tramoggia, che viene calata sul fondo del pozzo, riempita di materiale e lentamente risolledata in superficie: ciò garantisce un flusso continuo del materiale e minimizza l'eventuale separazione delle diverse granulometrie durante la posa in opera. Il filtro viene esteso per circa 60 cm al di sopra delle sfinestrature per premunirsi da eventuali assestamenti/cedimenti durante la fase di esercizio.

Il sistema di scarico delle acque può avvenire in maniera diversa e ciò consente di classificare i pozzi in:

- *Pozzi artesiani.* Questo sistema può essere usato solo in presenza di acquiferi confinati con livello piezometrico che supera la superficie del piano campagna. In questo caso i pozzi possono ridurre il livello piezometrico al più al livello del piano campagna.

- *Pozzi attrezzati con pompe elettriche* (figura 1.14). Questo sistema permette l'allontanamento dell'acqua mediante l'utilizzo di pompe opportunamente dimensionate in modo da garantire lo smaltimento delle portate drenate dal pozzo. Gli elevati costi di esercizio ne limitano l'utilizzo soltanto a casi particolari in cui altre tecniche non siano applicabili.

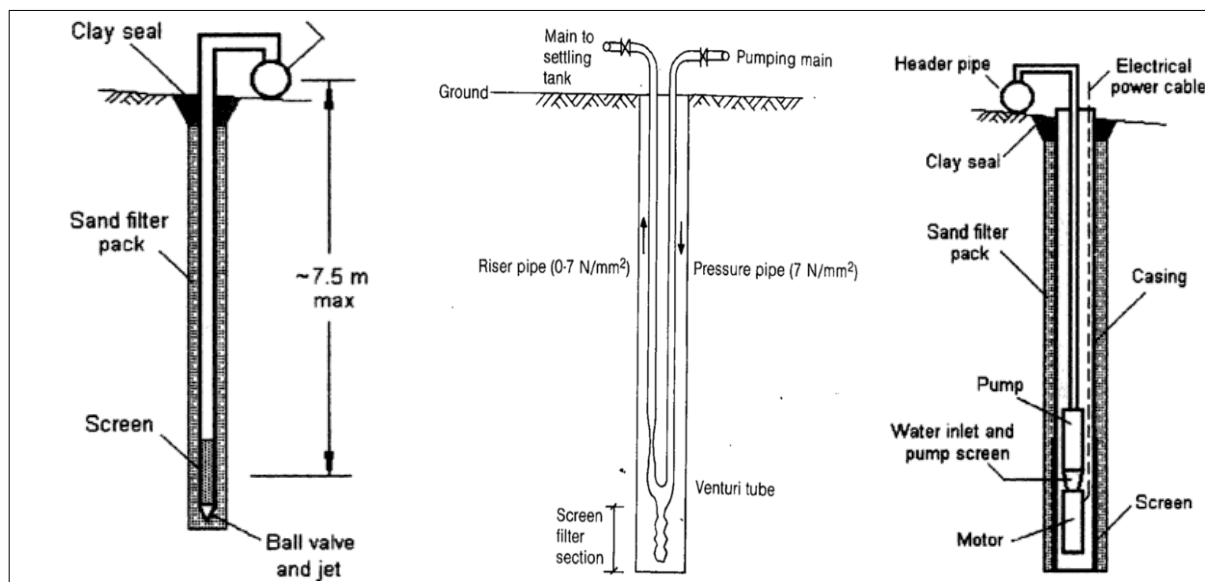


Figura 1.14: pozzi con pompe.

- *Dreni Sifone* (figura 1.15). Questa tecnica sfrutta l'effetto sifone per l'allontanamento delle acque drenate. Il sistema di scarico è collegato a due serbatoi a monte e a valle (figura 1.16); mantenendo un dislivello piezometrico costante tra i due serbatoi si garantisce un moto costante all'interno della condotta di scarico.

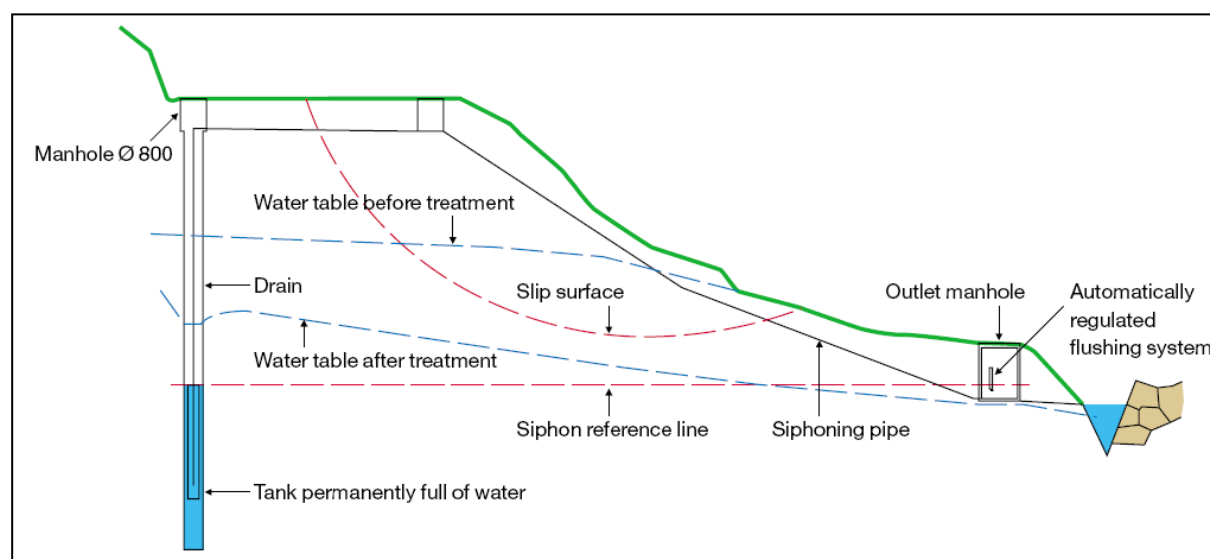


Figura 1.15: schema di funzionamento del sistema con dreni sifone (WJ Groundwater Ltd).

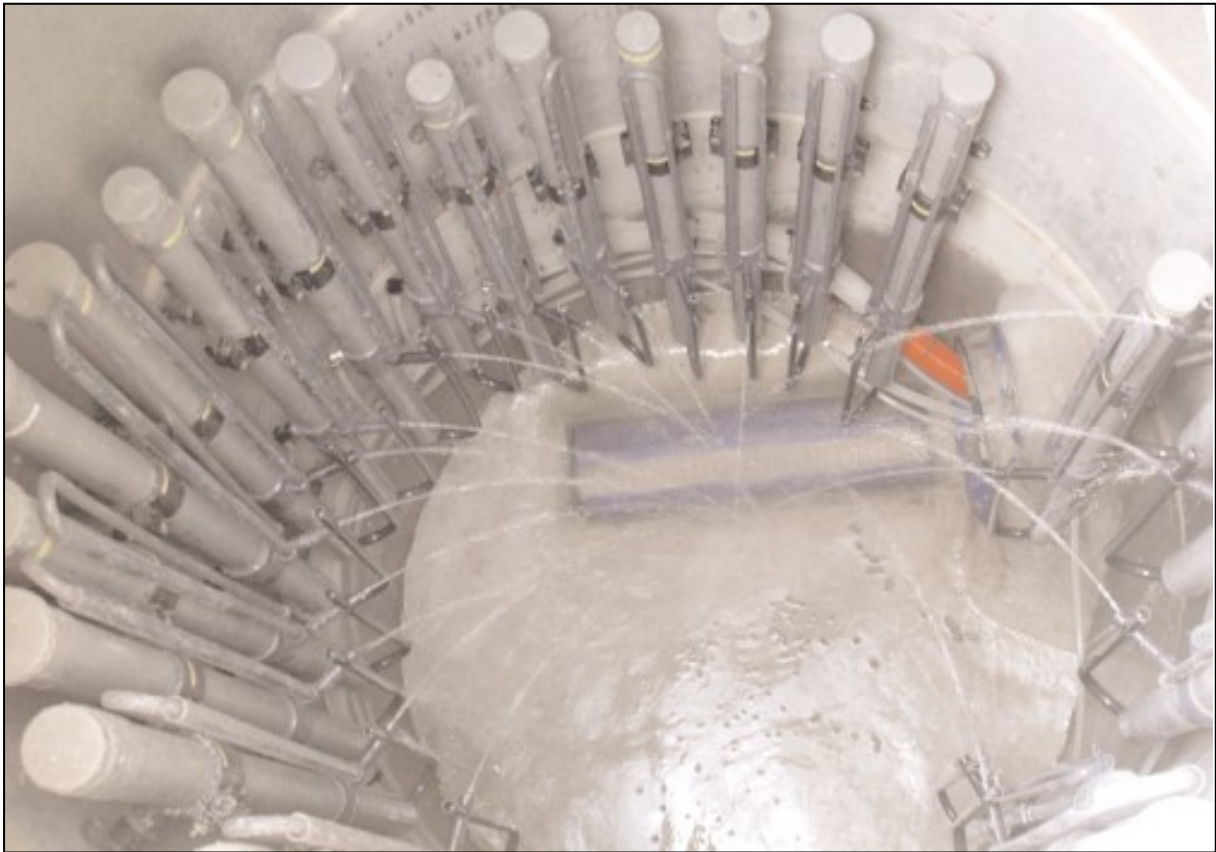


Figura 1.16: pozzetto di regolazione terminale del sistema con dreni sifone.

1.5.2 Pozzi drenanti di medio diametro

I pozzi drenanti di medio diametro (figura 1.17) rappresentano un sistema molto efficiente per la riduzione delle pressioni neutre all'interno di un pendio. La soluzione tecnologica consiste in allineamenti di pozzi di diametro compreso tra 1200 e 2000 mm, posti ad interasse di 6÷10 m interconnessi alla base da una condotta di fondo per l'allontanamento delle acque drenate. Proprio la possibilità di scarico per gravità delle acque, abbatta i costi di esercizio del sistema e rappresenta l'elemento distintivo di questa tecnologia rispetto agli altri tipi di pozzi.

A tal proposito, Bianco e Beligni (1983) riportano il confronto di un studio costi/benefici fra trincee drenanti e pozzi di medio diametro. Come si può analizzare in figura 1.18, a parità di profondità raggiunta dai due sistemi i pozzi risultano notevolmente più economici delle trincee e lo diventano sempre più, man mano che la profondità aumenta. Ogni pozzo può raggiungere agevolmente profondità di 30 m e, in casi particolari, anche superiori ai 50 m (BeerP.et al., 1992).

Oltre all'aspetto economico, la tecnica dei pozzi interconnessi costituisce una soluzione ideale in presenza di frane profonde, soprattutto nei casi in cui esse rappresentano un pericolo per centri abitati o zone densamente infrastrutturate (figura 1.19).

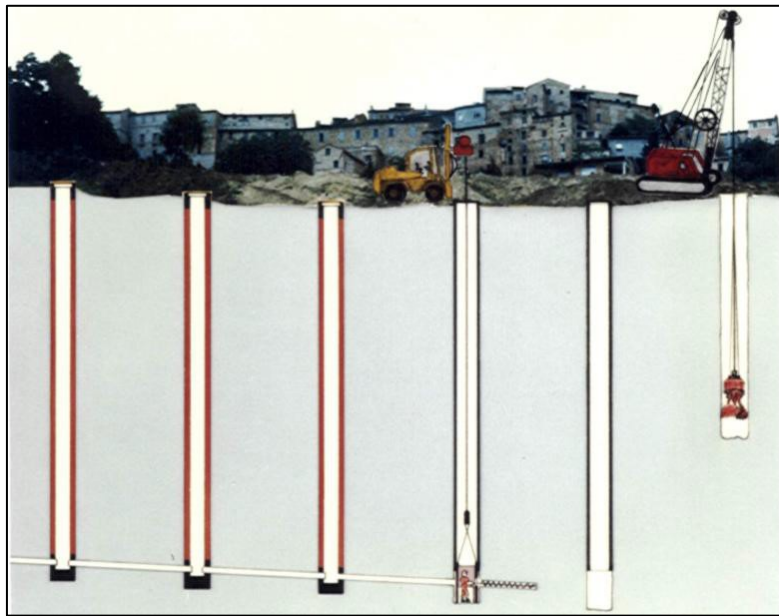


Figura 1.17: schema esecutivo dei pozzi drenanti di medio diametro (Manassero V., 2001).

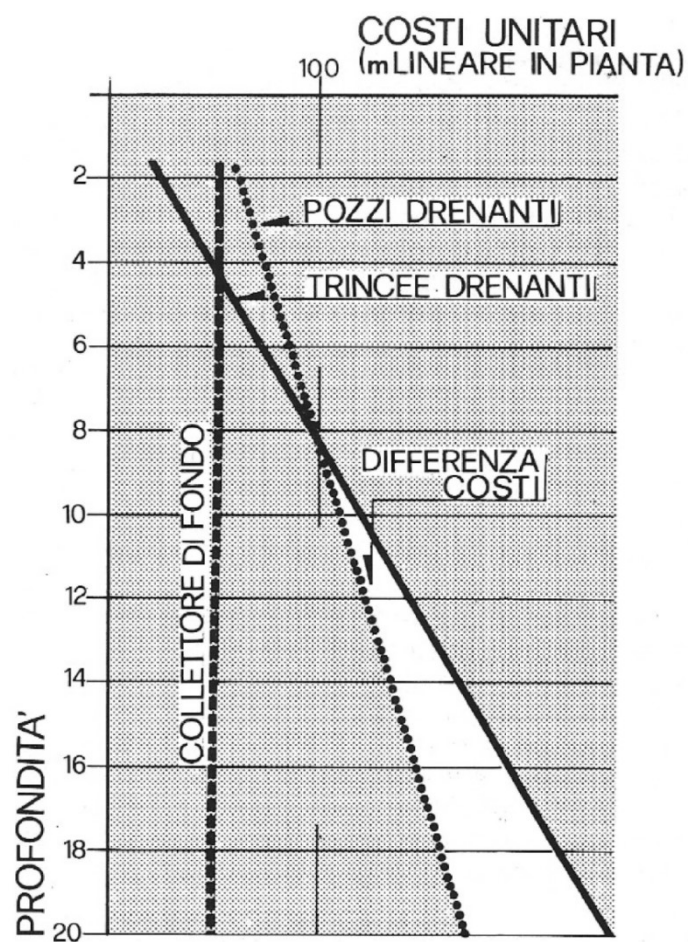


Figura 1.18: incidenza della profondità sui costi unitari di pozzi e trincee drenanti.

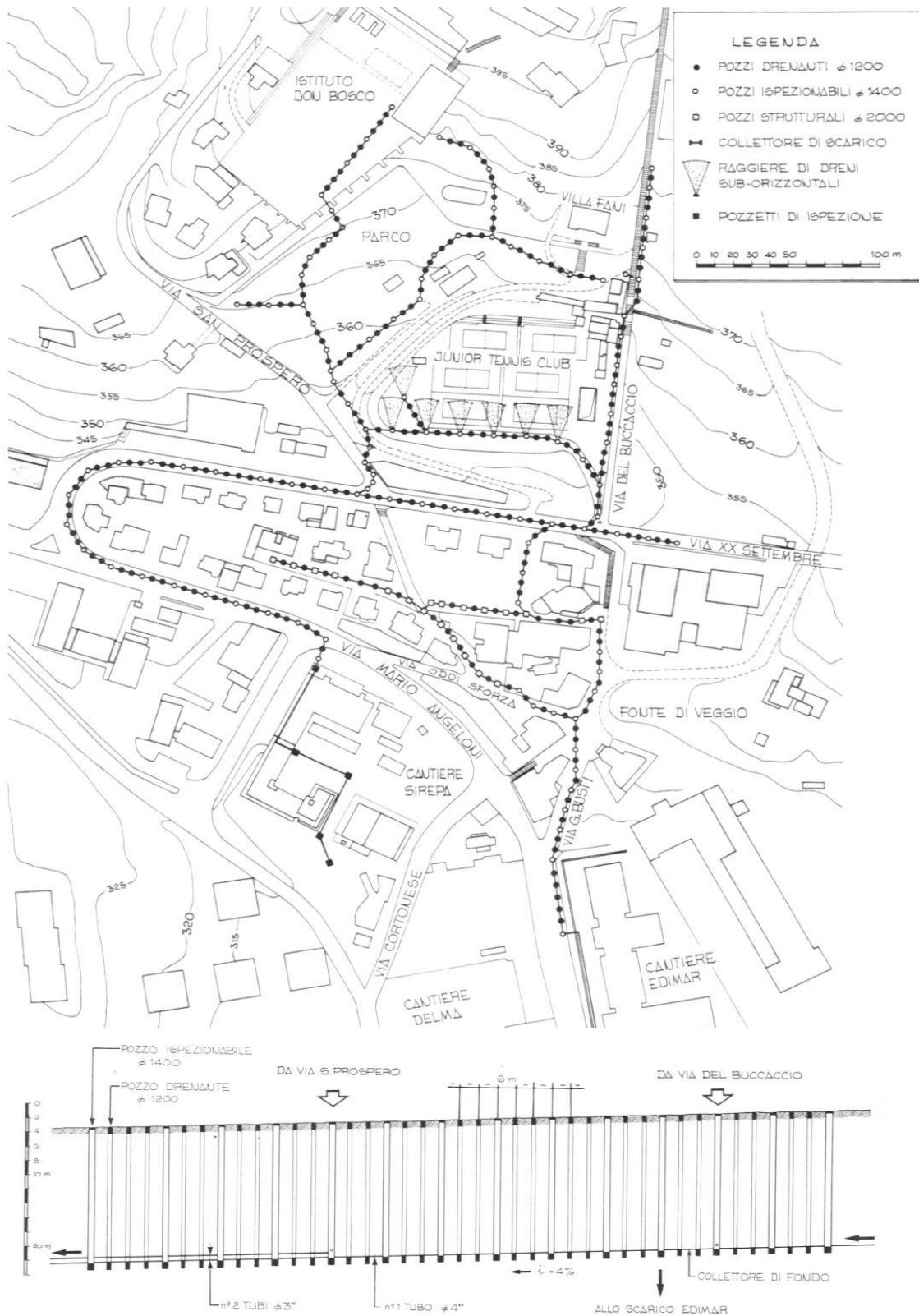


Figura 1.19: planimetria e sezione longitudinale di un allineamento di pozzi drenanti: la frana di Perugia Fontivegge, stabilizzata con più di 300 pozzi e 1800 metri di condotte.

In questi casi infatti il ricorso a trincee profonde o ad opere strutturali continue risulta spesso non applicabile per la presenza di manufatti che si frappongono alla loro continuità. Un ulteriore vantaggio rispetto alle trincee drenanti è rappresentato dalla possibilità di disporre i pozzi in allineamenti paralleli alla direzione trasversale del pendio, cosa che non sarebbe possibile per una trincea continua il cui scavo determinerebbe una condizione di debolezza fatale per le condizioni di stabilità del pendio.

La tecnologia prevede l'utilizzo di 3 tipologie di pozzi (figura 1.20):

- pozzi drenanti;
- pozzi ispezionabili;
- pozzi con funzione strutturale e drenante.

La realizzazione degli elementi prevede alcune fasi comuni per i tre tipi ed altre che ne differenziano le caratteristiche funzionali.

La prima fase è quella di perforazione che avviene con le tecniche normalmente utilizzate per i pali trivellati. Quando le caratteristiche del terreno lo richiedono, si ricorre ad un rivestimento provvisorio o al sostegno del foro con fanghi biodegradabili.

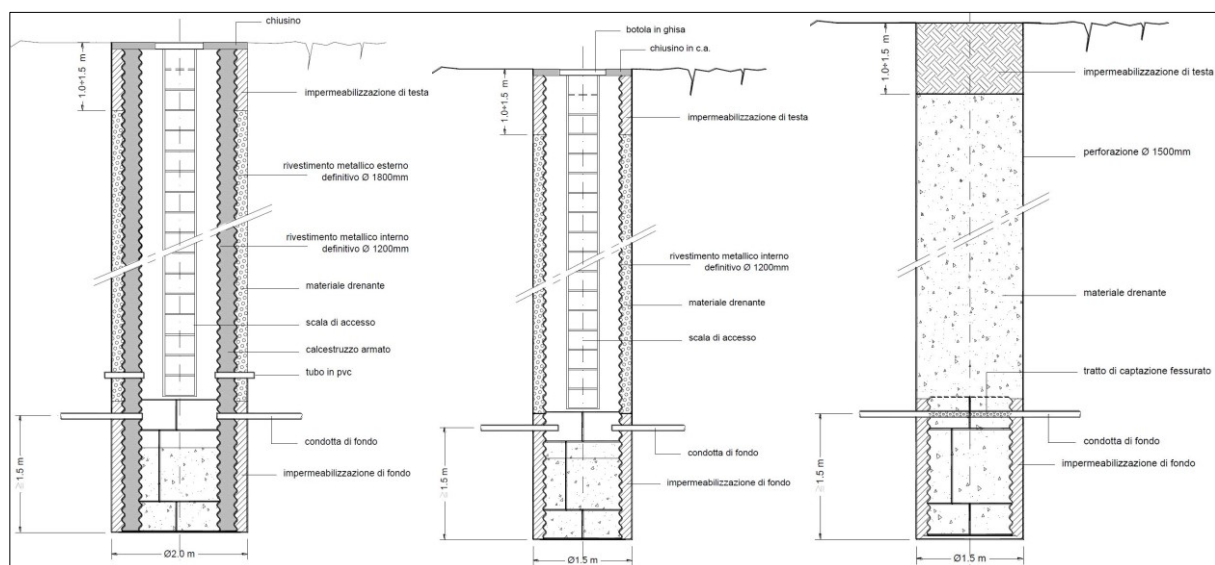


Figura 1.20: sezioni longitudinali delle diverse tipologie di pozzi: strutturale (sinistra), ispezionabile (centro), drenante (destra).

La seconda fase vede la realizzazione del foro orizzontale e la posa in opera della condotta di fondo mediante l'uso di una speciale attrezzatura di perforazione (figura 1.21). Le sue dimensioni ridotte permettono ad una piccola macchina, di potenza molto limitata, e all'operatore di lavorare all'interno dei pozzi ispezionabili del diametro interno di 1200 mm (al finito, 1500÷1800 all'esterno). Al termine della perforazione la condotta può essere

realizzata introducendo nel foro un'unica tubazione flessibile in materiale plastico, oppure una tubazione rigida, impiegando più pezzi di tubo opportunamente giuntati tra loro. In ogni caso la tubazione viene forata e rivestita di geotessile in corrispondenza di ogni pozzo per permettere l'ingresso dell'acqua all'interno del tubo.

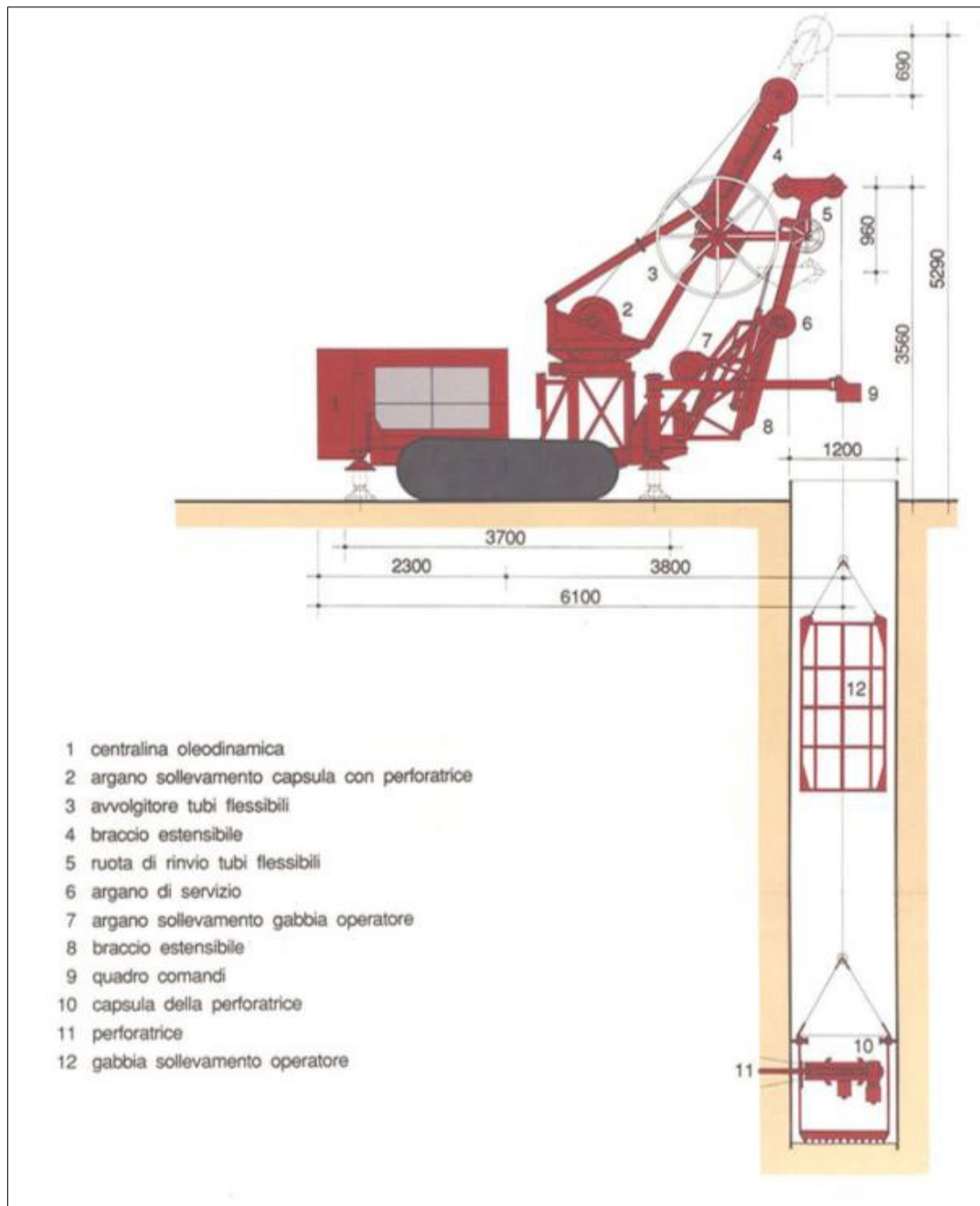


Figura 1.21: schema tipico di attrezzatura di perforazione per condotte di fondo (Manassero V., 2001).

Il manufatto viene completato con la realizzazione dell'impermeabilizzazione di fondo: Inoltre nei *pozzi non ispezionabili* si procede al riempimento del foro con materiale drenante, dalla granulometria opportunamente assortita. In ultimo viene realizzata una impermeabilizzazione di testa e ripristinata la superficie al piano campagna.

I pozzi *ispezionabili* hanno un ruolo cruciale in questa tecnologia. Essi permettono l'accesso al loro interno anche in esercizio. In questo modo offrono la possibilità di ampliare il sistema aggiungendo in qualsiasi momento nuove condotte di fondo, per recepire le acque di altri pozzi di nuova costruzione, oppure integrare il sistema drenante con ventagli di dreni sub-orizzontali lungo le pareti (di lunghezza limitata).

La funzione drenante viene garantita tramite la realizzazione di un cilindro riempito di materiale granulare, quest'ultimo viene realizzato tra la parete del foro ed un lamierino metallico, di diametro più piccolo del foro, appositamente posizionato. In seguito viene realizzata l'impermeabilizzazione del fondo e della testa, con la posa in opera di una scala di accesso e del chiusino carrabile. In relazione all'aggressività delle acque drenate, può essere necessaria la protezione del lamierino metallico con zincatura e, nei casi più estremi, con sistemi di protezione catodica (Lazzari L. e Manassero V., 1994).

La realizzazione dei *pozzi con funzione strutturale-drenante* è analoga a quella dei pozzi ispezionabili. In questo caso però vengono introdotti due lamierini metallici realizzando, in questo modo, due anelli concentrici. L'anello esterno viene riempito con materiale granulare in modo da realizzare un filtro drenante. Per quel che concerne l'anello interno, tra i due lamierini viene inserita prima una gabbia di armatura opportunamente dimensionata, in seguito viene effettuato il getto del calcestruzzo. Al termine di questa operazione si procede all'impermeabilizzazione del fondo e della testa con la posa in opera di una scala di accesso e del chiusino carrabile.

1.5.3 Pozzi strutturali/drenanti di grande diametro

Nei casi estremi in cui altri tipi di intervento sarebbero insufficienti, si può ricorrere ai *pozzi strutturali/drenanti di grande diametro* ($> 5\div 15$ m), detti anche *cassoni* (figura 1.22). Solitamente ai pozzi di grande diametro viene affidata sia la funzione strutturale che la funzione drenante.

A seconda del terreno e delle attrezzature disponibili, la costruzione dei pozzi può avvenire con diverse tecniche (Manassero V., 2011):

- realizzazione della struttura durante lo scavo in sotto-murazione, con getto di anelli successivi;
- realizzazione di un sostegno provvisorio delle pareti di scavo mediante una coronella di micropali o colonne di terreno consolidato con *jet grouting* o congelamento artificiale del

terreno, collegata con centinatura metallica, successivo scavo del pozzo e realizzazione con getti rampanti della struttura definitiva;

- realizzazione di un sostegno delle pareti di scavo con pali accostati o secanti o con diaframmi che, eventualmente assistiti con irrigidimenti locali, quali anelli in c.a. di ripartizione, costituiscono anche la struttura definitiva del pozzo;
- realizzazione del pozzo con attrezzatura VSM (Vertical Shaft-sinking Machine).

La scelta della tecnica realizzativa dipende dalle caratteristiche del terreno e dalle macchine disponibili. In ogni caso l'accessibilità al sito da parte di differenti macchine può avere un peso determinante nella scelta della tecnica da utilizzare.

La funzione drenante viene generalmente affidata ad un sistema di microdreni sub-orizzontali disposti su più livelli a partire dalla superficie laterale del pozzo. Il diametro del pozzo viene progettato, in base alle esigenze strutturali, per garantire una adeguata resistenza, ed è sempre superiore ai 5 m per garantire l'accesso a macchine operatrici di opportuna potenza. Infatti il diametro dei pozzi drenanti deve essere sufficientemente ampio da permettere di operare dal suo interno con apparecchiature di potenza idonea a realizzare le aste drenanti; a seconda del tipo di terreno circostante, le apparecchiature convenzionali permettono di realizzare dreni sub-orizzontali fino a 30 m, mentre con apparecchiature più performanti, possono essere realizzati dreni con lunghezze superiore a 50 m e fino a circa 100 m.



Figura 1.22: cassone con coronella di pali.

Lo scarico delle acque avviene, senza l'ausilio di pompe, per mezzo di una o due tubazioni di scarico realizzate alla base dei pozzi. La collocazione di pozzi di grande diametro in unione

ad altri sistemi drenanti è prassi abbastanza comune. In figura 1.23 è riportato lo schema planimetrico di un intervento realizzato per la società autostrade da Leoni F. e Manassero V. (2003) in cui, in uno dei pozzi, vengono convogliate le acque drenate da tre rami di schermi drenanti, realizzati con pozzi di medio diametro.

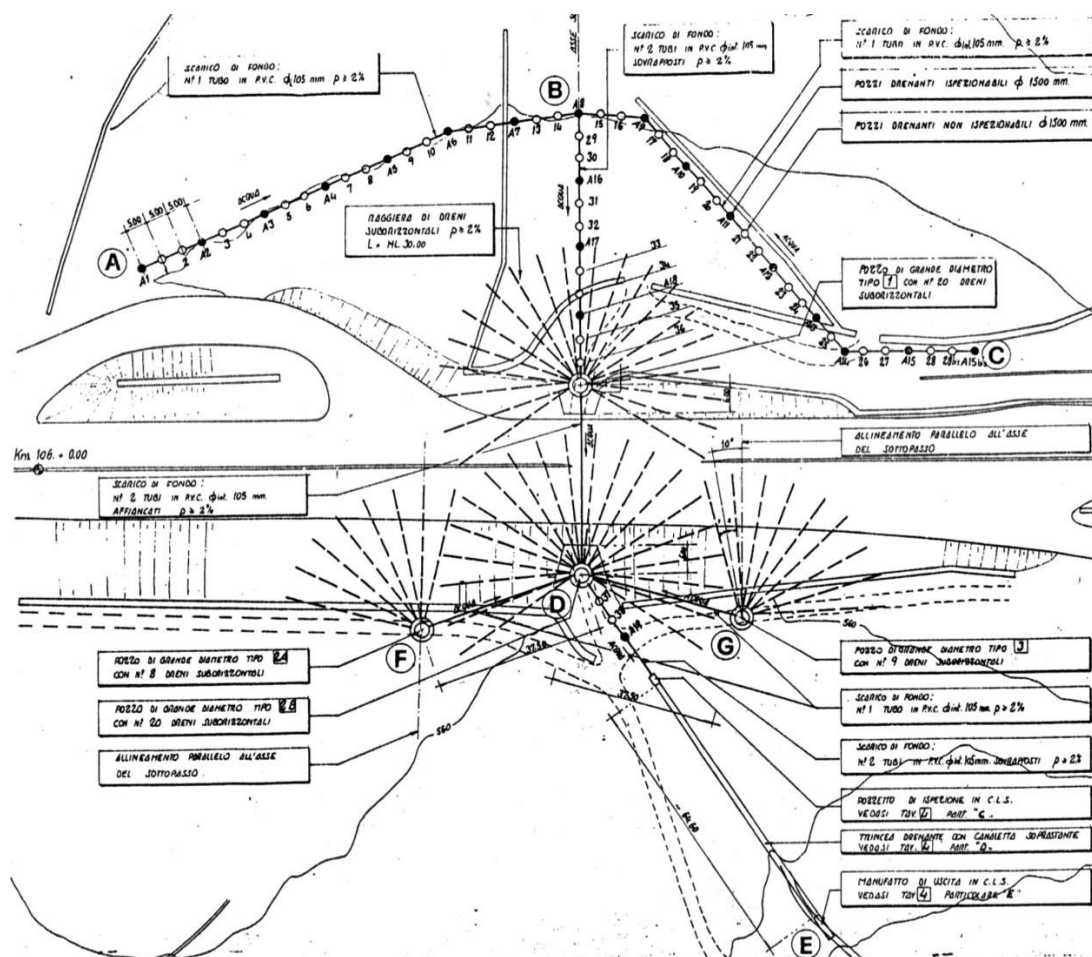


Figura 1.23: autostrada A16 Napoli-Canosa; movimento franoso al km 106+250. Planimetria dell'intervento di drenaggio profondo (Leoni F. e Manassero V., 2003).

1.6 Gallerie drenanti

Le *gallerie drenanti* sono usate per movimenti franosi ampi e profondi (30-35 m), quando il sottosuolo è inadatto all'uso di trincee o pozzi drenanti, e quando è impossibile lavorare in superficie per mancanza di spazio per le macchine. Le gallerie sono molto costose, ma possono essere vantaggiose in formazioni rocciose in cui la filtrazione avviene attraverso fessure ravvicinate. Devono essere realizzate nella parte stabile del pendio.

La galleria può prevedere un sistema di tunnel che intercettino i flussi di acqua sotterranea e sistemi di drenaggio integrati costituiti da micro-dreni di lunghezza 50÷60 m (figura 1.24). Il

diametro varia generalmente da un minimo di 2 m ad un massimo di 3.5 m, e viene scelta, come nel caso dei pozzi a cassone, in base alle attrezzature necessarie per la realizzazione dei dreni da suo interno.



Figura 1.24: gallerie di drenaggio con aste drenanti.

Il recapito a gravità delle acque drenate è realizzato con tubazioni poste sotto la pavimentazione; i dreni dovrebbero avere una copertura rimovibile per consentirne una facile ispezione e manutenzione. In rocce fortemente deteriorate è necessario realizzare un sostegno permanente del cavo con getti di calcestruzzo rinforzato. In questo caso, è necessario progettare un opportuno filtro drenante per conferire questa funzione alla galleria.

1.7 Sviluppi tecnologici nella realizzazione di opere di drenaggio

Gli sviluppi tecnologici degli ultimi anni hanno contribuito al miglioramento delle tecniche già esistenti. Sono state incrementate da un lato l'efficacia stessa delle opere, dall'altro la fattibilità in situazioni che ne precludevano l'utilizzo. Inoltre alcune tecniche innovative come l'*HDD (Horizontal Directional Drilling)* e il *Microtunneling*, rappresentano soluzioni autonome, ampliando così il ventaglio delle tecniche a disposizione dei progettisti. In questo paragrafo viene descritta la tecnica HDD ed i vantaggi che essa introduce, soprattutto nell'ambito della realizzazione di sistemi di pozzi drenanti di medio diametro, che rappresentano l'oggetto principale di questo lavoro.

L'HDD nasce come tecnica sviluppata per la realizzazione di condotte in sotterraneo. Il principale vantaggio di questo sistema risiede nella capacità di permettere la posa in opera di tubi, senza la necessità di effettuare scavi a cielo aperto. Il risultato è la possibilità di attraversare terreni non accessibili dal piano campagna per la presenza di alcuni vincoli, come ad esempio corsi d'acqua, infrastrutture, abitazioni ecc.. Questa tecnica permette inoltre di spingersi a profondità molto superiori a quelle normalmente raggiungibili con scavi a cielo aperto.

Oggi il campo di applicazione della tecnica è stato notevolmente ampliato ed esteso a moltissime lavorazioni. Congelamento, iniezioni per il consolidamento e drenaggio dei terreni sono alcune delle lavorazioni che hanno maggiormente beneficiato delle HDD.

Indipendentemente dal tipo di applicazione, le fasi operative per la posa di una tubazione mediante perforazione teleguidata sono essenzialmente tre:

- Fase1: *esecuzione del foro pilota*. Si tratta della fase più delicata delle fasi di lavoro. La perforazione avviene a distruzione di nucleo mediante la perforazione del terreno per mezzo di un *fluido viscoso di perforazione*, costituito generalmente da una sospensione di acqua e bentonite (minerale argilloso totalmente atossico) oppure da polimeri sintetici biodegradabili, che, passando attraverso le aste di perforazione, fuoriescono ad alta pressione dalla testa di perforazione. La funzione del fango è di estrema importanza per la pulizia del foro, per il raffreddamento della testa di perforazione, per la lubrificazione delle aste e dei tubi e per la stabilizzazione del foro.

La pressione della miscela è regolabile da 1 fino a 350 bar in funzione del litotipo da perforare, mentre l'inclinazione del getto rispetto all'asse longitudinale della testa permette di scegliere la direzione del foro: la lancia, che avanza con la spinta prodotta dalla macchina perforatrice, tenderà ad introdursi nel foro creato dal getto di fango, aiutata anche da una particolare conformazione grazie alla quale riceve la contropinta del terreno (figura 1.25).

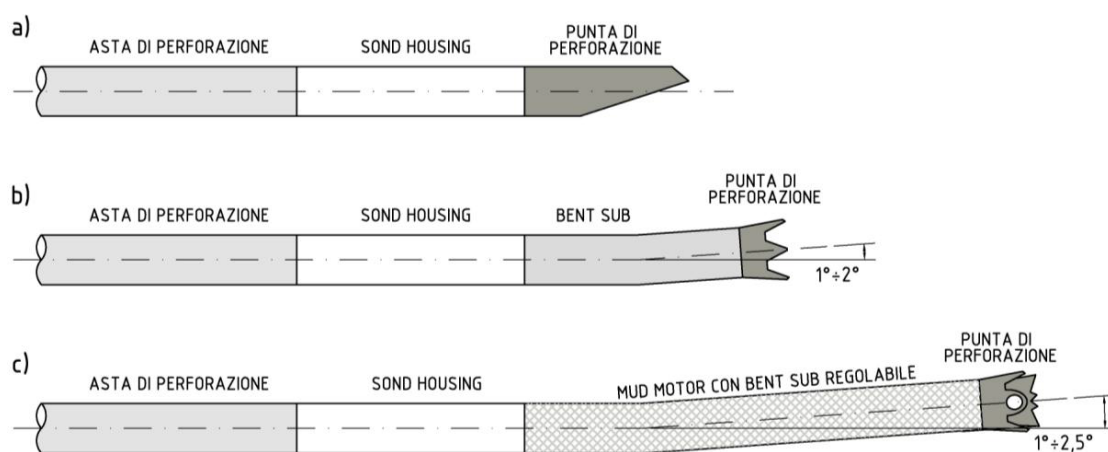


Figura 1.25: particolare della testa perforante teleguidata.

Il controllo totale della testa di perforazione, può essere effettuata mediante due principali famiglie di sistemi, in funzione della profondità dal piano campagna, delle condizioni al contorno e della precisione richiesta: sistemi *walk over* (figura 1.26) e sistemi magnetici (MGS acronimo di Magnetic Guidance System) permettono di controllare la perforazione rispetto alle seguenti variabili:

- profondità
- inclinazione
- direzione nel piano orizzontale.

Il sistema di localizzazione magnetico, più preciso, permette un controllo spaziale della perforazione fino ad oltre 100 m di profondità con precisione centimetrica.

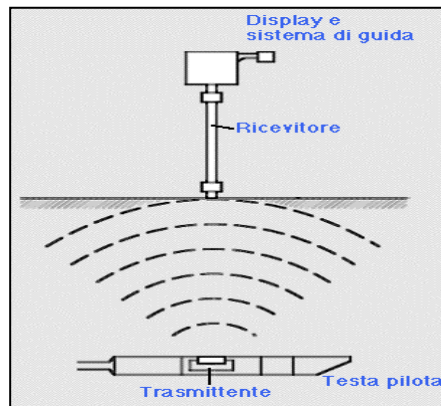


Figura 1.26: schema d'impianto di teleguida.

Attraverso il foro, di diametro di poco superiore alla testa di perforazione, si verifica il deflusso del fango in eccesso, che viene raccolto via via in una buca realizzata a piano campagna, garantendo così una circolazione costante durante la perforazione.

- Fase 2: *alesatura del foro*. Terminato il foro pilota, la testa di perforazione viene sostituita da particolari alesatori, che vengono trascinati a ritroso lungo lo stesso percorso per allargare il diametro del foro. Essi ruotano grazie al moto trasmesso dalle aste di perforazione ed esercitano un'azione fresante sul terreno, coadiuvati dai getti di fango (questa volta agenti in senso ortogonale all'asse del foro).
- Fase 3: *tiro e posa della tubazione*. In fase di alesatura, oppure dopo opportune pre-alesature, viene trascinato il tubo, o il fascio di tubi, agganciato all'alesatore con un giunto snodato, per evitare che il moto di rotazione venga trasmesso al tubo stesso.

Utilizzando apposite tubazioni drenanti in HDPE in luogo delle comuni condotte, questa tecnica permette la realizzazione di *microdreni* che si innestano nel terreno direttamente dal piano campagna. Ciò è particolarmente utile in pendii poco acclivi, laddove le classiche tecniche non permettono il raggiungimento di profondità elevate, quando questo è necessario. Un ulteriore vantaggio introdotto dall'HHD è la possibilità di realizzare dreni di una lunghezza notevole, senza problemi di deviazione che affliggono le perforazioni sub-orizzontali convenzionali. Infatti, grazie al controllo direzionale, è possibile correggere eventuali deviazioni, garantendo in ogni caso il rispetto delle tracce previste in sede progettuale.

Per quanto riguarda i pozzi di medio diametro, le tecnologie HDD hanno portato una decisa innovazione. Infatti la realizzazione delle condotte di fondo con la tecnica tradizionale dall'interno del pozzo, rappresenta oggi giorno uno dei limiti notevoli di questa tecnica. Il motivo principale è il forte inasprimento della normativa in materia di sicurezza, che ha fatto

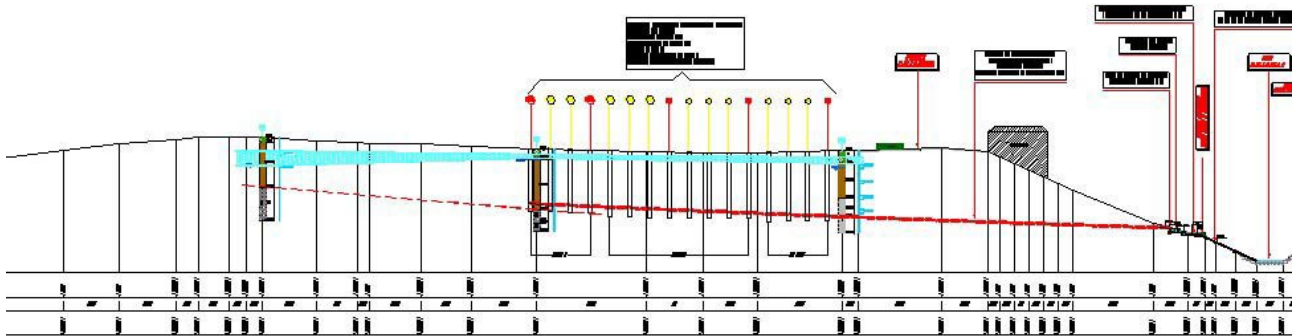


Figura 1.29: scarico di fondo dei pozzi drenanti realizzati per la stabilizzazione del movimento franoso di Camerana.

In questo caso è stato eseguito un pre-foro passante della lunghezza di 230 m che intercettava 13 pozzi drenanti a profondità variabile dai 15 ai 18 m per poi proseguire a valle fino all'uscita dove è stato attaccato e tirato un tubo in HDPE Ø 90 mm, creando così lo scarico di fondo di tutto il sistema drenante.

Lo stesso autore descrive l'utilizzo dell'HDD per la posa in opera di una condotta di fondo, realizzata per lo scarico delle acqua da un pozzo ispezionabile $\Phi 1500$ in località Rossena (RE).

2 Progettazione delle opere di drenaggio

2.1 Introduzione

La progettazione di un intervento di stabilizzazione mediante sistemi drenanti rappresenta un problema di ingegneria piuttosto complesso. Le pressioni neutre, all'interno di un pendio, sono influenzate da una molteplicità di fattori tra i quali: pioggia, infiltrazione, evapotraspirazione, superfici di discontinuità, disomogeneità e anisotropia idraulica (in quanto superfici o strati di circolazione preferenziale dell'acqua). Costruire un modello di calcolo capace di portare in conto tutti questi fattori è pretenzioso, sebbene i moderni hardware e software consentirebbero la soluzione di analisi così complesse, permangono i dubbi sulla calibrazione dei tanti parametri che un ipotetico modello globale richiederebbe. Inoltre, in tutte le discipline dell'ingegneria civile, esiste sempre la necessità di usare strumenti semplici, quantomeno per il controllo dei risultati che si ottengono da modellazioni più complesse.

L'obiettivo di questo capitolo è descrivere gli strumenti che la letteratura mette a disposizione dei tecnici per la progettazione dei drenaggi, che storicamente è sempre stata improntata ad un sostanziale empirismo.

Per primo viene descritto il concetto di *efficienza* idraulica, analizzando il ruolo di questo parametro che spesso viene utilizzato nel dimensionamento dei drenaggi. In seguito sono descritti i caratteri peculiari di un processo di drenaggio. Il cuore del capitolo è rappresentato dalla modellazione di riferimento per problemi di filtrazione. Infine saranno riportate alcune delle soluzioni disponibili in letteratura per le tecnologie già descritte in precedenza.

2.2 Efficienza dei drenaggi in un pendio indefinito

La condizione di stabilità di un pendio viene generalmente espressa dal fattore di sicurezza globale, FS . Per ogni possibile superficie di scorrimento, Γ , continua ed emergente sul pendio, il coefficiente FS_{Γ} è il rapporto fra l'integrale della resistenza del terreno e l'integrale della sollecitazione tangenziale lungo la suddetta superficie. Detto G il gruppo delle superfici Γ_i investigate, il valore $FS = \min \{FS_{\Gamma_i}, \forall \Gamma_i \in G\}$ è il fattore di sicurezza del pendio e la superficie Γ_{crit} a cui esso compete viene denominata superficie di scorrimento critica. Si può parimenti definire un fattore di sicurezza locale, definito in un punto su una assegnata giacitura, espresso dal rapporto tra la resistenza disponibile, τ_f , e la tensione tangenziale agente, τ_{α} .

Nel caso di un pendio indefinito (figura 2.1) i fattori di sicurezza globale e locale coincidono. Se il pendio è inclinato di un angolo α ed è sede di un moto di filtrazione stazionario, con direzione del flusso parallela al piano campagna, il fattore di sicurezza può essere agevolmente calcolato su un qualsiasi piano Γ , anch'esso parallelo al piano campagna e posto alla profondità Z :

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_\alpha} = \frac{c' + (\sigma_\alpha - u_0) \cdot \operatorname{tg} \varphi'}{\tau_\alpha} \quad (2.1)$$

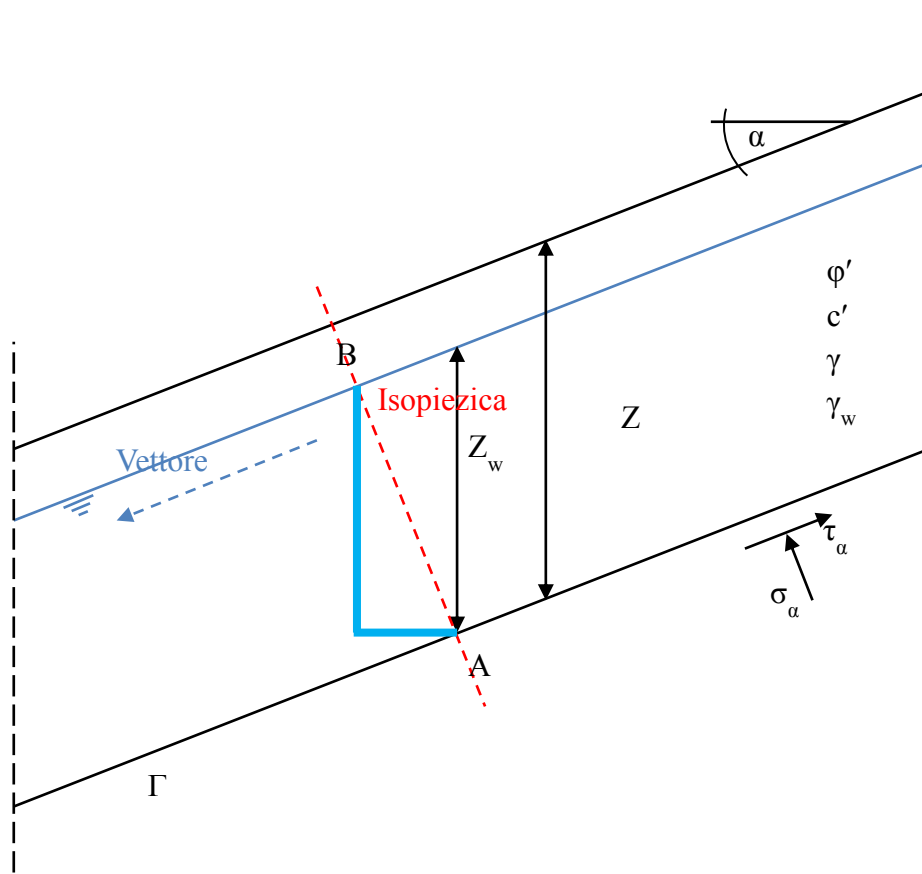


Figura 2.1: schema di pendio indefinito con filtrazione parallela al piano campagna.

Dove φ' e c' sono l'angolo di attrito e la coesione del terreno in condizioni drenate, mentre le tensioni totali e la pressione neutra valgono:

$$\tau_\alpha = \gamma \cdot Z \cdot \cos \alpha \sin \alpha$$

$$\sigma_\alpha = \gamma \cdot Z \cdot \cos^2 \alpha$$

$$u_0 = \gamma_w \cdot Z_w \cdot \cos^2 \alpha$$

in cui γ e γ_w sono, rispettivamente, il peso specifico del terreno e dell'acqua.

Analizzando l'equazione (2.1) si può osservare che il fattore di sicurezza è somma di tre contributi:

$$FS_1 = \frac{c'}{\tau_\alpha}, \quad FS_2 = \frac{\sigma_\alpha' \cdot \operatorname{tg} \varphi'}{\tau_\alpha}, \quad FS_3 = -\frac{u_0 \cdot \operatorname{tg} \varphi'}{\tau_\alpha}$$

Il termine FS_3 di segno negativo indica che una riduzione delle pressioni neutre positive da u_0 a u genera un incremento positivo del fattore di sicurezza:

$$\Delta F = \Delta FS_3 = - \frac{\Delta u \cdot tg\varphi'}{\tau_\alpha}$$

Infatti:

$$\Delta u = u - u_0 < 0$$

ed il massimo valore di ΔF si ottiene annullando le pressioni neutre sulla superficie di scorrimento critica Γ_{crit} , ovvero quando:

$$u = 0 \Rightarrow \Delta u = \Delta u_{max} = u_0 \Rightarrow \Delta F = \Delta FS_3 = \frac{u_0 \cdot tg\varphi'}{\tau_\alpha}$$

E' prassi considerare il valore nullo della pressione neutra come valore minimo di progetto. Nei terreni a grana fine sulla superficie di scorrimento potrebbe instaurarsi un valore di pressione neutra negativa, ma questa circostanza non viene mai considerata.

Si definisce, in ogni punto $P(x,y,z)$ di un generico dominio, l'efficienza idraulica come il rapporto tra la riduzione delle pressioni neutre ($-\Delta u$) e la massima riduzione conseguibile nel punto in esame:

$$E(x,y,z) = -\frac{\Delta u}{u_0} = -\frac{u - u_0}{u_0} = \frac{u_0 - u}{u_0} = 1 - \frac{u}{u_0}$$

A seguito della realizzazione di un opera di drenaggio, il sottosuolo è sede di un moto vario che nasce per ristabilire l'equilibrio con le condizioni al contorno. Durante tale fase transitoria le pressioni neutre, e pertanto l'efficienza idraulica, risultano funzione anche del tempo (figura 2.2):

$$E(x,y,z,t) = \frac{u_0 - u(t)}{u_0}$$

È possibile calcolare il valore medio dell'efficienza su una assegnata superficie Γ come:

$$\bar{E}\Gamma(t) = -\frac{\int_{\Gamma}[u_0 - u(t)]ds}{\int_{\Gamma}u_0 ds}$$

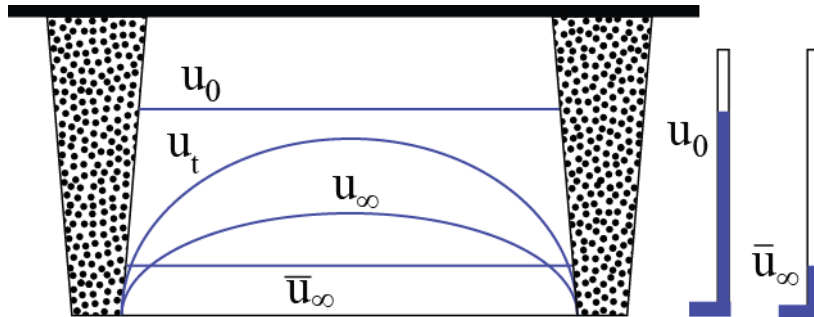


Figura 2.2: isocrone di pressioni neutre su un piano passante per la base di trincee drenanti.

Per il caso illustrato di pendio indefinito, data la natura monodimensionale del problema, l'efficienza media sulla superficie Γ coincide con l'efficienza puntuale (punto A, Figura 2.1):

$$\bar{E}(Z, t) = E(t) = \frac{u_0 - u(t)}{u_0} = \frac{\Delta F(t)}{\Delta F_{max}}$$

Da ciò si ottiene che l'efficienza idraulica, per un pendio indefinito, coincide con il rapporto tra l'incremento del coefficiente di sicurezza raggiunto al tempo t e quello massimo raggiungibile. È stato dimostrato che, per terreno omogeneo, questa eguaglianza vale anche per geometrie più complesse.

In base ai ragionamenti illustrati, l'incremento del coefficiente di sicurezza del pendio può essere calcolato, a partire dall'efficienza dell'opera, come una aliquota del valore massimo ottenibile in assenza di pressioni neutre:

$$\Delta FS(t) = \bar{E}(t) \cdot \Delta FS_{max}$$

Viceversa, il progetto di un'opera di drenaggio può essere effettuato a partire dall'incremento di sicurezza necessario, calcolando l'efficienza richiesta all'opera e la geometria del sistema in grado di garantirla. È prassi, in tale procedura, fare riferimento al valore medio dell'efficienza in condizioni stazionarie definito come:

$$\bar{E} \Gamma(\infty) = - \frac{\int_{\Gamma} [u_0 - u(\infty)] ds}{\int_{\Gamma} u_0 ds}$$

2.3 Moto dell'acqua nel sottosuolo: equazioni reggenti

La descrizione del moto dell'acqua nel pendio richiede un approccio analitico basato sulla teoria della consolidazione. La realizzazione di un'opera di drenaggio rappresenta, dal punto di vista fisico-matematico, una variazione delle condizioni al contorno del dominio di terreno drenato che rompe l'equilibrio idraulico del pendio. In terreni di ridotta permeabilità, sede di frane spesso stabilizzate con drenaggi, la risposta del terreno allo squilibrio idraulico ha una durata non trascurabile, retta dall'equazione di continuità della fase fluida. Nell'ipotesi che l'acqua e le particelle di terreno sia *incomprimibili*, l'equazione di governo è:

$$\text{div } \vec{V} = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (2.2)$$

Dove:

ε_v = deformazione volumetrica unitaria,

\vec{V} = vettore velocità di flusso.

Nell'ipotesi che il terreno sia *saturo* e lo scheletro solido sia assimilabile ad un mezzo *elastico, lineare, omogeneo ed isotropo* dotato di rigidità E e modulo di Poisson ν , la deformazione volumetrica vale:

$$\varepsilon_v = \frac{\partial p'}{\partial t} \cdot \frac{3(1 - 2\nu)}{E}$$

Con:

p' = tensione efficace media.

Considerando il principio delle tensioni efficaci:

$$p' = p - u$$

E ricordando che può scriversi:

$$u = (h - \zeta) \cdot \gamma_w$$

Si ottiene:

$$p' = p - (h - \zeta) \cdot \gamma_w$$

Per cui:

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} + \gamma_w \frac{\partial \zeta}{\partial t} - \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t}$$

Dove:

h = quota piezometrica,

ζ = quota geometrica,

p = tensione totale media.

In linea di principio la tensione principale media p , potrebbe variare durante il processo di consolidazione e quindi dovrebbe essere calcolata risolvendo il problema idro-meccanico accoppiato, che consiste nella soluzione di un sistema che contenga oltre le equazioni sulla massa fluida anche quelle del problema meccanico (equazioni indefinite dell'equilibrio, di congruenza e legame costitutivo dello scheletro solido). A questo proposito Biot (1941) fu il primo autore a pubblicare l'impostazione e la soluzione di un problema di consolidazione accoppiato.

Quando si studia l'effetto dei drenaggi nella stabilizzazione dei pendii è prassi considerare nulla la variazione della tensione totale media nel dominio che consolida. Questa ipotesi consente di separare il problema idro-meccanico in due sottosistemi idraulico e meccanico che possono essere studiati separatamente.

In un problema disaccoppiato:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = 0$$

e

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = -\gamma_w \frac{\partial h}{\partial t}$$

Pertanto l'equazione di continuità diventa:

$$\operatorname{div} \vec{V} = \gamma_w \frac{3(1-2\nu)}{E} \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$$

Nell'ulteriore ipotesi che il flusso sia laminare è possibile applicare la legge di Darcy:

$$V_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Dove K_x , K_y e K_z rappresentano la conducibilità idraulica del mezzo nella direzione degli assi coordinati.

Si ottiene in questo modo l'equazione di Terzaghi-Rendulic:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \gamma_w \frac{(1-2\nu)}{E} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.3)$$

Infine sotto l'ipotesi che il mezzo sia omogeneo nei confronti della conducibilità idraulica la (2.3) diventa:

$$K \cdot \nabla^2(h) = \gamma_w \frac{(1-2\nu)}{E} \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$$

Raggruppando tutte le costanti in un unico termine detto coefficiente di consolidazione tridimensionale, c_{v3D} :

$$c_{v3D} = \frac{K \cdot E}{\gamma_w(1-2\nu)}$$

si ottiene l'equazione finale:

$$c_{v3D} \cdot \nabla^2(h) = \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.4)$$

Dal punto di vista matematico, quella ottenuta è una equazione alle derivate parziali (PDE) del secondo ordine nota come *equazione della diffusione*. Essa trova svariate applicazioni nelle scienze: in fisica regola l'andamento della temperatura, in chimica l'andamento della concentrazione di una sostanza e, come detto, in idraulica dei mezzi porosi il valore della quota piezometrica in un processo di consolidazione. In tutti i casi descrive l'andamento della funzione in una regione dello spazio e del tempo. Proprio per questo l'equazione, come tutte le PDE in cui compaiono sia le variabili spaziali che quelle temporali, prende il nome di equazione di *evoluzione*.

Man mano che il fenomeno descritto si esaurisce, teoricamente dopo un tempo infinito, il problema tende ad una condizione stazionaria in cui il flusso è permanente, e sono nulle tutte le derivate rispetto al tempo. In tal caso il moto è descritto da una equazione *stazionaria* che prende il nome di equazione di Laplace:

$$\nabla^2(h) = 0$$

In entrambi i casi la soluzione dell'equazione dipende dalle condizioni al contorno. Queste possono essere di tre tipi:

- Condizioni di Dirichlet: rappresentano condizioni in cui la funzione incognita (h) ha un andamento noto sulla frontiera del dominio.
- Condizioni di Neuman: situazioni in cui è noto il flusso, ovvero la derivata prima spaziale della funzione incognita, sulla frontiera del dominio.
- Condizione di Robin: nota anche come condizione mista, rappresenta il caso in cui vi è una relazione tra la funzione e il flusso sulla frontiera del dominio.

Solo nel caso dell'equazione di evoluzione (ossia in condizioni transitorie) è necessario conoscere la distribuzione iniziale della funzione. Tale condizione influenza solo la fase transitoria e quindi la durata del processo di diffusione, mentre la distribuzione "finale" dipende solo dalle condizioni al contorno.

Quando si fa riferimento ad una modellazione bidimensionale o monodimensionale, le equazioni rimangono invariate nella loro natura, mentre varia il coefficiente di consolidazione. In tabella 2.1 vengono riassunte le equazioni e i termini che regolano la consolidazione in condizioni bi e mono-dimensionali.

Condizioni	2D	1D
Equazioni	$h_t - c_v^{2D}(h_{xx} + h_{zz}) = 0$	$h_t - c_v^{1D}h_{zz} = 0$
p' (tensione media efficace)	$\frac{(\sigma'_x + \sigma'_z)(1 + \nu)}{3}$	$\frac{\sigma'_z(1 + \nu)}{3(1 - \nu)}$
ϵ_v (deformazione volumetrica)	$\frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{E}d(\sigma'_x + \sigma'_z)$	$\frac{1 - \nu - 2\nu^2}{(1 - \nu)E}d\sigma'_z$
Ipotesi	$d(\sigma'_x + \sigma'_z) = 0$	$d\sigma'_z = 0$
c_v (coefficiente di consolidazione)	$c_v^{2D} = \frac{KE}{2 \cdot \gamma_w(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$	$c_v^{1D} = \frac{KE \cdot (1 - \nu)}{\gamma_w(1 - \nu - 2\nu^2)}$

Tabella 2.1: equazione della consolidazione e parametri per i casi 1D e 2D.

È prassi comune analizzare il problema della filtrazione facendo riferimento all' equazione di Terzaghi-Rendulic in forma adimensionale:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial Z^2} = \frac{\partial H}{\partial T}$$

In cui, detto g uno dei parametri geometrici del problema (ad esempio: altezza delle trincee, lunghezza dei dreni, profondità del substrato limite inferiore ecc.), tutte le grandezze geometriche vengo adimensionalizzate rispetto a tale parametro ed espresse con la lettera maiuscola:

$$X = \frac{x}{g}, \quad Y = \frac{y}{g}, \quad Z = \frac{z}{g}, \quad H = \frac{h}{g}$$

Il termini che tengono conto dell'evoluzione del processo c_v e t , vengono uniti all'interno di una unica variabile adimensionale detta *fattore di tempo* T :

$$T = \frac{c_{vD} t}{g^2}$$

L'utilizzo dell'equazione in forma adimensionale ha un ruolo di assoluto rilievo negli studi parametrici che verranno illustrati nei prossimi paragrafi

2.4 Analisi delle condizioni al contorno

Come già illustrato nel precedente capitolo, la distribuzione della quota piezometrica e quindi delle pressioni neutre può essere ottenuta imponendo appropriate condizioni iniziali ed al contorno. Per mezzi dotati di permeabilità molto basse, per i quali non vale l'ipotesi di Dupuit (1863), la distribuzione delle quote piezometriche preesistenti rappresenta la condizione iniziale. La realizzazione delle opere drenanti rappresenta invece una nuova condizione al contorno.

In particolare sulla superficie di interfaccia tra i drenaggi ed il terreno viene generalmente assunta pressione neutra nulla, ovvero una quota piezometrica h coincidente con la quota geometrica ζ . Quando si trascura, come quasi sempre si fa, la suzione al di sopra della superficie piezometrica, nel senso che si impone pressione neutra nulla laddove essa sarebbe negativa, la condizione al contorno descritta può essere mantenuta fissa durante l'intero svolgimento del calcolo. Se invece si volesse considerare il campo di suzione, la suddetta condizione idraulica sul contorno dei drenaggi dovrebbe essere sostituita da quella di contorno impermeabile per l'intero tratto in cui il drenaggio è a contatto col dominio al di sopra della superficie piezometrica (ove regna la pressione neutra negativa). Se così non si facesse si otterrebbe una soluzione irrealistica in cui i drenaggi alimenterebbero il terreno circostante.

La condizione da imporre sul piano campagna viene scelta in un'ampia possibilità di soluzioni in funzione del regime pluviometrico, delle caratteristiche del terreno, nonché della vegetazione, dell'irradiazione solare diretta e di altri fattori meteorologici che regolano l'interazione fra l'acqua del sottosuolo e l'atmosfera. L'adozione di modelli di infiltrazione complessi, è giustificata quando l'interesse è rivolto agli strati più superficiali del terreno. Nel caso dei drenaggi in terreni argillosi, dove l'interesse è spesso rivolto agli strati di terreno profondi interessati dalle superfici di scivolamento, al bordo superiore possono essere assegnate tre possibili condizioni (figura 2.3):

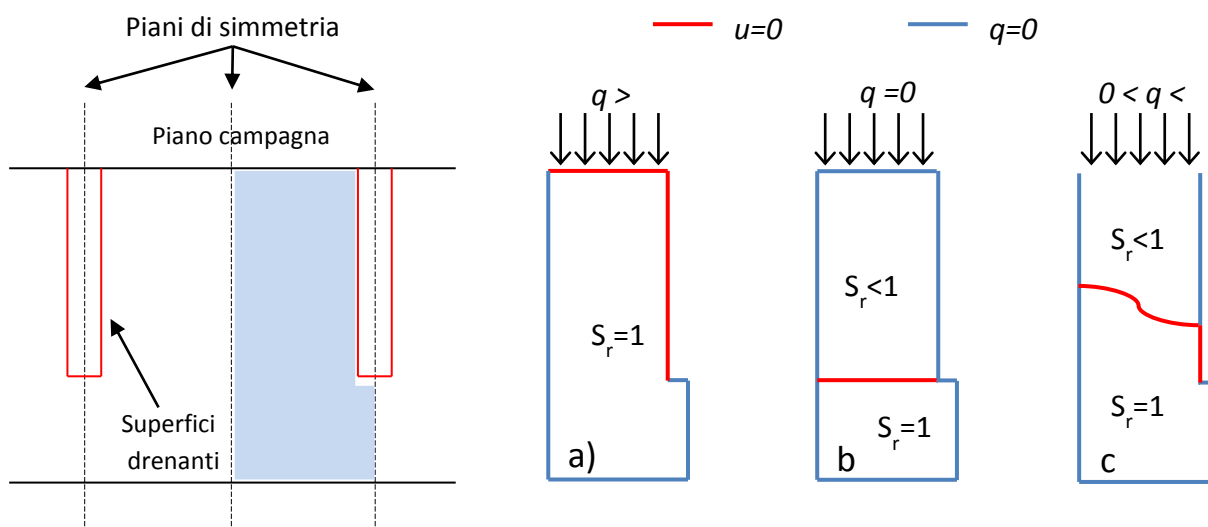


Figura 2.3: schema delle condizioni al contorno i presenza di drenaggi: a) lama d'acqua, b) superficie impermeabile, c) superficie libera; adattato da Desideri et al., 1997.

- a) Lama d'acqua: questa ipotesi assume che il valore della pressione neutra sul piano campagna sia nullo ($h=\zeta$). E' rappresentativa di una condizione in cui l'intensità di pioggia è maggiore della permeabilità del terreno ($q>k$), con la conseguente presenza di ruscellamento di una certa quantità di acqua non in grado di infiltrarsi e quindi di una lama in grado di alimentare l'infiltrazione. Il processo raggiunge una condizione stazionaria in cui il moto di filtrazione è diretto dal piano campagna verso il sottosuolo e verso i drenaggi. Tale condizione di moto permanente non dipende dal tipo di terreno ma soltanto dalla geometria del sistema. Le pressioni neutre all'interno del terreno sono sempre positive (la superficie piezometrica è rappresentata dalla lama di acqua a piano campagna), il che comporta un'efficienza del sistema drenante sempre minore dell'unità.
- b) Superficie impermeabile: in questo caso si assume che il flusso normale al piano campagna sia nullo ($q=0$). Non c'è presenza di infiltrazione né di evaporazione. In queste condizioni le pressioni all'interno del terreno sono regolate sia dalla geometria che dal tipo di terreno. Al termine del processo si ottiene una superficie a pressione neutra nulla, in corrispondenza della quota più bassa raggiunta dai drenaggi. Sulla stessa superficie si raggiunge efficienza idraulica unitaria. Nella zona sovrastante, il terreno sarà parzialmente saturo e le pressioni neutre negative. In realtà questo risultato si ottiene solo modificando opportunamente la condizione assunta sulla superficie dei drenaggi, per evitare che essi fungano da serbatoio, generando un flusso diretto dal loro interno verso il terreno, nella zona in cui le pressioni neutre sono nulle. Questa particolare condizione, prende il nome di *superficie di filtrazione* e, come si è già scritto, prevede: una pressione nulla sulla superficie drenante immersa nella zona saturo; un flusso nullo sulla superficie drenante situata nella zona parzialmente saturo.

- c) Superficie libera: questa condizione rappresenta una situazione intermedia tra i due casi limite precedenti, ed è quella che meglio approssima la realtà. Essa assume la presenza di un flusso arbitrario al piano campagna ($0 < q < k$). Il dominio di filtrazione viene separato in due zone da una superficie, a pressione nulla, che non è nota a priori. In un terreno reale, nella zona superiore il grado di saturazione del terreno è minore dell'unità, mentre nella zona inferiore il suo valore è unitario. Le pressioni neutre e la posizione della superficie libera dipendono dal tipo di materiale attraverso la porosità efficace $n_e = n(1 - S_r)$, in cui n è la porosità e S_r è il grado di saturazione. La porosità efficace rappresenta la percentuale di volume dei pori che viene drenata in seguito all'abbassamento della superficie libera. Nel caso di una sabbia ideale risulta $n_e = n$, da cui si ottiene un grado di saturazione nullo; infatti in questo caso il terreno al disopra della falda risulterebbe completamente asciutto (prosciugamento). Nel caso limite opposto di argilla ideale, la porosità efficace è $n_e = 0$, corrispondente ad un grado di saturazione unitario; in questo caso il terreno al disopra della falda rimarrebbe saturo. Infine, anche quando si considera la condizione di superficie libera, il contorno drenante deve essere modellato come una superficie di filtrazione.

L'effetto delle differenti condizioni al piano campagna, sul processo di drenaggio è stato analizzato da diversi autori. In figura 2.4 sono riportati i risultati di uno studio effettuato da Burghignoli e Desideri (1987) per il caso di dreni tubolari. Il grafico mostra l'evoluzione dell'efficienza, in funzione del fattore tempo, per i due casi limite di apporto nullo (curva superiore) e lama d'acqua (curva inferiore) oltre che per il caso della superficie libera (curve intermedie).

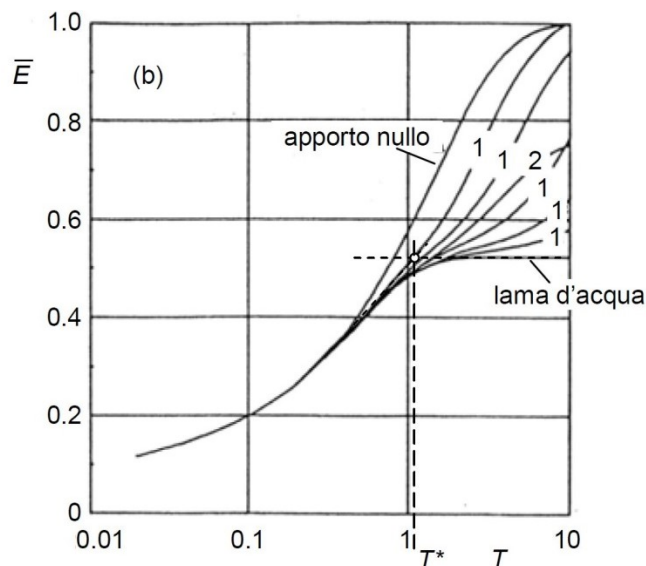


Figura 2.4: effetto delle condizioni al contorno e della porosità efficace sull'evoluzione dell'efficienza nel tempo (Burghignoli e Desideri, 1987): 1) effetto porosità efficace n_e ; 2) apporto non nullo $q/k_v = 0,25$.

Analizzando i risultati ottenuti, gli autori osservano come l'evoluzione temporale del processo sia indipendente dalla condizione assunta al piano campagna, fino al raggiungimento di un valore caratteristico del fattore tempo T^* . In corrispondenza di tale valore si raggiunge il valore massimo dell'efficienza idraulica media, nelle condizioni di lama d'acqua. Gli stessi autori suggeriscono che quest'ultima ipotesi sia la più opportuna da adottare nella progettazione delle opere di drenaggio. In questo modo infatti, si fa affidamento a valori di efficienza certamente raggiungibili, prescindendo dai valori della porosità efficace e dall'entità delle piogge, rendendo il progetto più sicuro e più agevole.

2.5 Soluzioni esistenti per il dimensionamento dei drenaggi

In questo paragrafo vengono illustrati alcuni dei numerosi lavori disponibili in letteratura per la modellazione dei sistemi di drenaggio. Alcuni autori propongono soluzioni per il dimensionamento delle opere derivanti da analisi parametriche. Altri studi sono finalizzati alla calibrazione di modelli, più o meno complessi, sui dati ottenuti dal monitoraggio di opere esistenti.

2.5.1 Trincee drenanti

L'efficienza idraulica di sistemi costituiti da trincee drenanti è stata analizzata da vari autori. Una sintesi dei lavori disponibili in letteratura è riportata in tabella 2.2 (Urciuoli e Pirone, 2013).

Letteratura	Geometria	Terreno	Metodo adottato	Condizioni	Condizione al bordo superiore
Hutchinson 1977	2-D	Mezzo poroso omogeneo isotropo	Elementi Finiti	Stazionarie	Lama d'acqua al piano campagna
Bromhead, 1984	2-D	Mezzo poroso omogeneo anisotropo	Soluzione Analitica	Stazionarie	Lama d'acqua al piano campagna
Stanic, 1985	3-D	Mezzo poroso omogeneo isotropo	Elementi Finiti	Stazionarie	Lama d'acqua al piano campagna
Di Maio et al., 1986	2-D	Mezzo poroso omogeneo isotropo	Differenze Finite	Transitorie	Flusso normale nullo
					Lama d'acqua al piano campagna
					Superficie piezometrica libera
Desideri et al., 1997	2-D	Mezzo poroso omogeneo anisotropo	Differenze Finite	Transitorie	Lama d'acqua al piano campagna (condizione iniziale idrostatica)
Pun, Urciuoli 2008	3-D	Mezzo poroso omogeneo isotropo	Differenze Finite	Stazionarie	Lama d'acqua al piano campagna
	2-D			Transitorie	Flusso entrante in funzione del tempo

Tabella 2.2: letteratura di riferimento per l'analisi del funzionamento di trincee drenanti.

2.5.1.1 Condizioni di flusso piane

Le soluzioni più utilizzate, per questo tipo di drenaggi, si basano su *condizioni di flusso piane* facendo riferimento ad una geometria semplificata di tipo bidimensionale. Tale approssimazione è lecita in quanto lo sviluppo longitudinale delle trincee è molto maggiore rispetto al loro interasse.

Desideri et al. (1997) analizzano il comportamento delle trincee con riferimento allo schema piano in figura 2.5. Le ipotesi considerate sono: piano campagna orizzontale, condizioni iniziali idrostatiche, lama d'acqua al piano campagna, terreno omogeneo e isotropo limitato inferiormente da uno strato impermeabile ad una profondità H . La soluzione è riportata in termini di efficienza media stazionaria (\bar{E}_∞) in abachi adimensionali (figura 2.6). Il comportamento del sistema dipende dalla geometria attraverso i rapporti S/H_0 ed H/H_0 . Lo spessore della trincea B non influenza la soluzione in quanto viene ritenuto costante e dato dal rapporto B/H_0 pari 0.16.

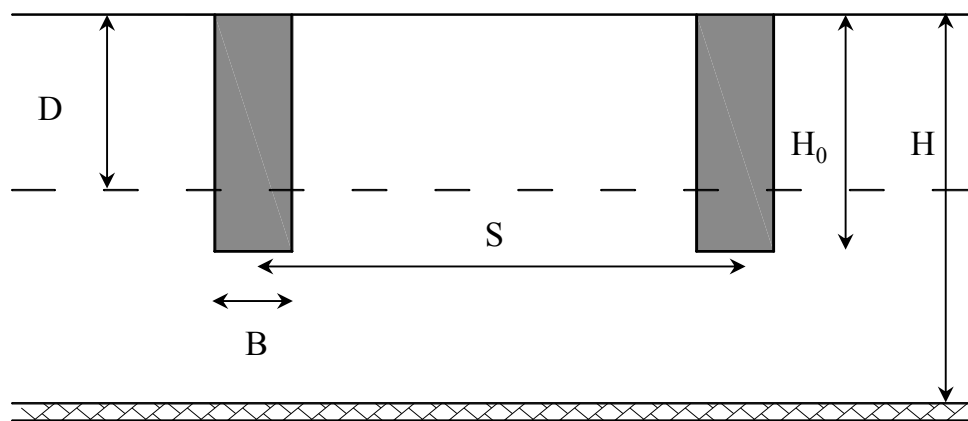


Figura 2.5: schema geometrico considerato da Desideri et al. (1997).

Il progetto delle trincee consiste essenzialmente nel dimensionamento dell'interasse S in quanto l'altezza delle trincee H_0 viene generalmente assegnata in funzione della tecnologia di scavo disponibile o scelta. Una volta calcolata l'efficienza media richiesta all'opera, si entra negli abachi tenendo conto della profondità del substrato impermeabile e della profondità della superficie di scorrimento D , entrambi dati assegnati, e si ottiene l'interasse.

La soluzione stazionaria è valida anche nel caso di terreno anisotropo nei confronti della permeabilità. In questo caso si può infatti utilizzare un fattore di scala $\sqrt{k_h/k_v}$ da applicare all'interasse, trascurando l'errore indotto dalla larghezza B della trincea che non è affetta dalla variazione di scala (Bromhead, 1984).

Per quel che concerne la fase transitoria, la durata del processo viene espressa in abachi adimensionali in termini di fattore di tempo :

$$T = \frac{k_v}{\gamma_w \cdot H_0^2} \cdot \frac{E'}{2(1 + \nu') \cdot (1 - 2\nu')} t$$

Una volta entrati con l'interasse di progetto, gli abachi (figura 2.7) forniscono il valori del fattore di tempo T_{50} e T_{90} necessari a raggiungere il 50% ed il 90% dell'efficienza a regime del sistema.

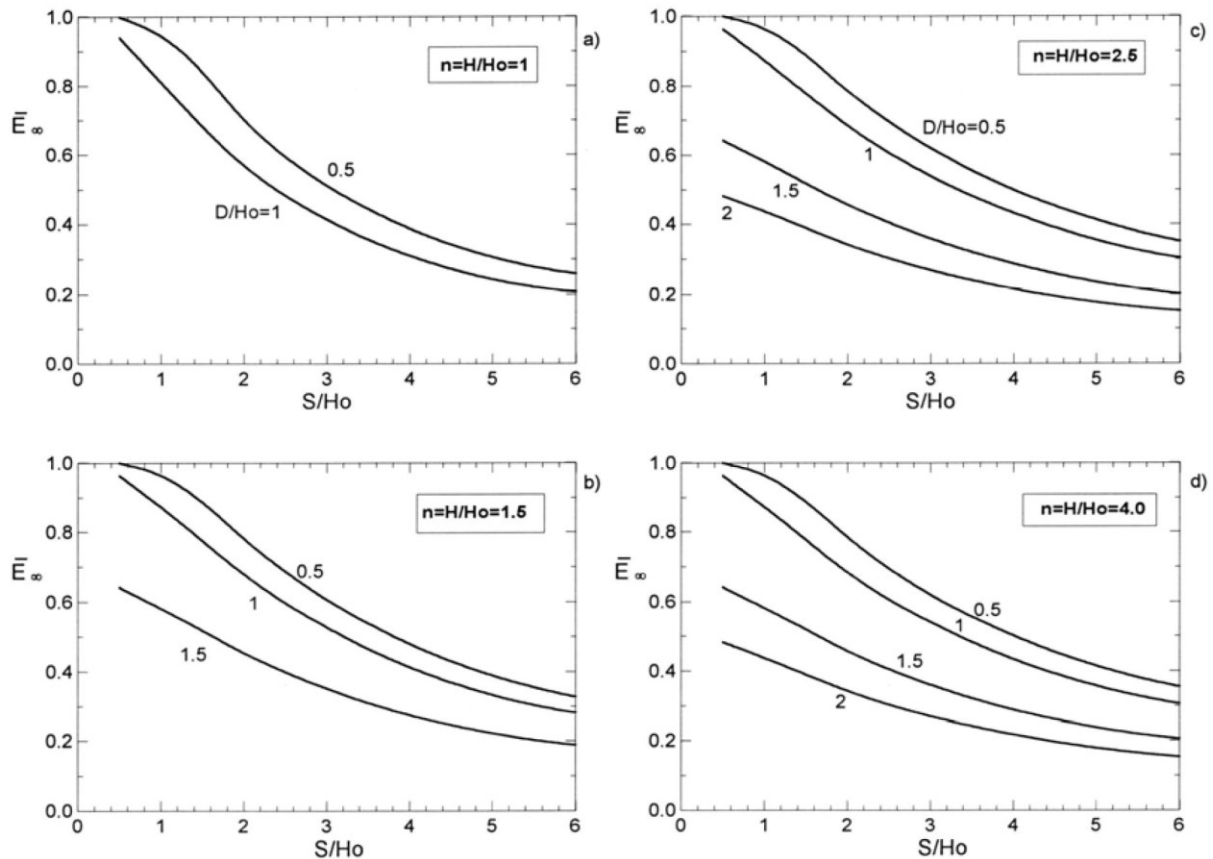


Figura 2.6: abachi per il dimensionamento di un sistema di trincee drenanti (Desideri et al., 1997).

Con riferimento allo stesso schema considerato da Desideri et al. (1997) sono state ottenute soluzioni per la condizione di superficie impermeabile al piano campagna (Di Maio et al., 1986). Le soluzioni sono espresse in termini di efficienza in funzione del fattore di tempo in figura 2.8. A differenza del caso precedente, l'efficienza viene calcolata solo su una superficie, la cui profondità corrisponde a quella per la base delle trincee e del substrato impermeabile ($D=H_o=H$). Questo studio mostra l'effetto che ha l'interasse solo sulla durata del processo, in quanto l'efficienza a regime, per la condizione imposta al bordo superiore, risulta sempre unitaria.

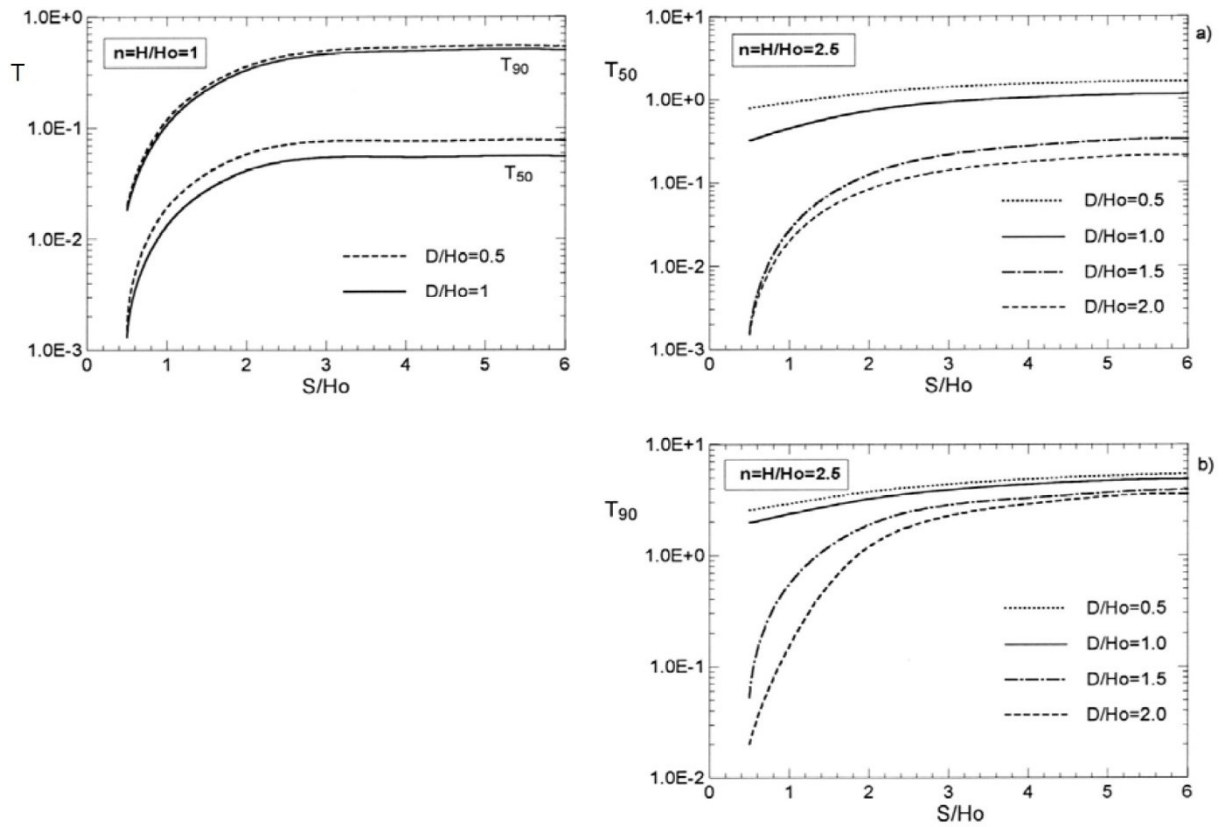


Figura 2.7: evoluzione temporale del processo indotto da un sistema di trincee drenanti (Desideri et al., 1997).

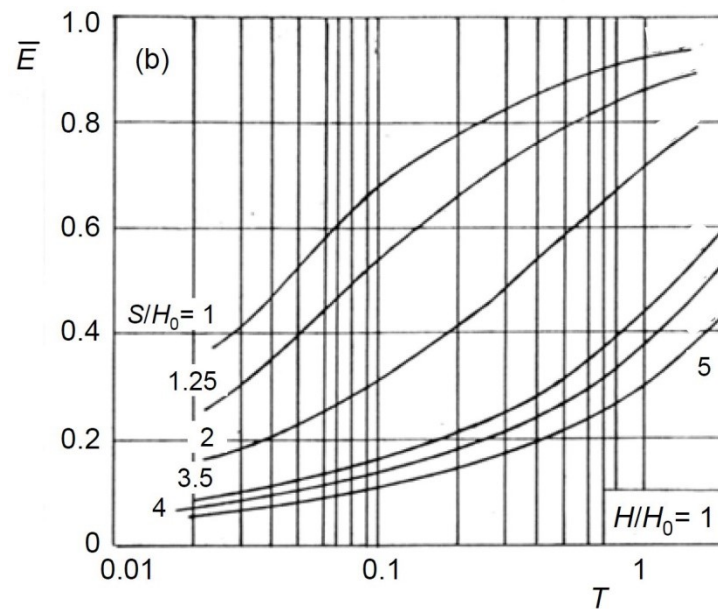


Figura 2.8: evoluzione dell'efficienza in funzione della distanza tra le trincee, nel caso di piano campagna impermeabile (Di Maio et al., 1986).

Soluzioni per la condizione di superficie libera sono state ottenute da Burghignoli e Desideri (1983) e da Di Maio e Viggiani (1987) rispettivamente nelle ipotesi prima di flusso nullo al piano campagna e poi apporto variabile. In questi casi la velocità di spostamento della superficie libera va calcolata di pari passo con l'evoluzione della consolidazione. Essa dipende oltre che dalla geometria, anche da permeabilità, porosità, deformabilità e dai flussi in ingresso e in uscita dal sistema.

I primi autori analizzano l'efficienza calcolata sul piano passante per la base delle trincee. La profondità del substrato impermeabile in questo caso non coincide con lo stesso piano ma è pari ad $1,5H_0$. Per tener conto delle variabili in gioco viene introdotto un parametro adimensionale I_m che tiene conto di: geometria, porosità efficace, costanti elastiche del mezzo:

$$I_m = \frac{\gamma_w \cdot S}{n_e} \cdot \frac{2(1 + \nu') \cdot (1 - 2\nu')}{E'}$$

e modificato il fattore di tempo in:

$$T = \frac{k_v \cdot S}{n_e} \cdot t$$

In figura 2.9 viene riportata l'efficienza in funzione di T e I_m , per il caso di interasse tra le trincee $S=2H_0$. I risultati mostrano che, a parità di geometria, un incremento di rigidità del terreno (incremento di I_m) aumenta la velocità del processo di drenaggio. In ogni caso, essendo nullo il flusso in ingresso l'efficienza raggiunge sempre valori unitari.

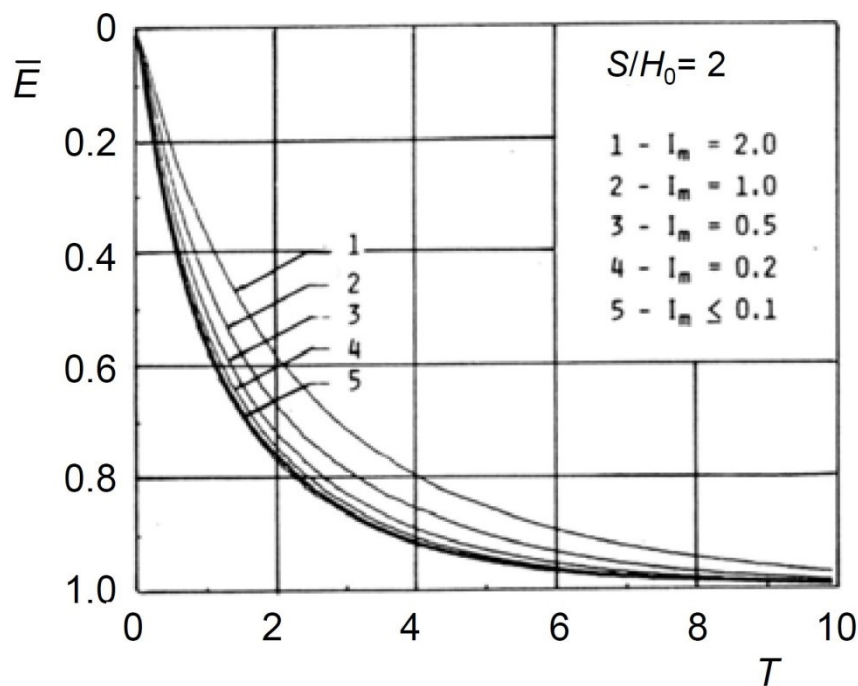


Figura 2.9: evoluzione dell'efficienza nell'ipotesi di superficie libera (Burghignoli e Desideri, 1983).

In figura 2.10 sono invece rappresentati i fattori di tempo T_{90} e T_{50} in funzione di I_m e delle caratteristiche geometriche del sistema.

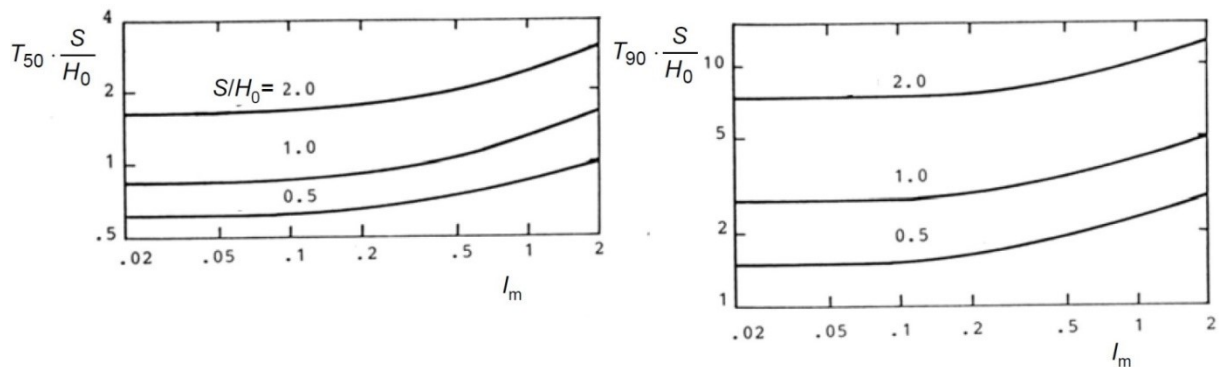


Figura 2.10: valori del fattore tempo T_{50} e T_{90} in funzione dei parametri geometrici (Burghignoli e Desideri, 1983).

Il caso riportato da Di Maio e Viggiani riguarda un terreno saturo ($S_r=1$, $n_e=0$), sottoposto ad un flusso intermittente in ingresso al piano campagna. I risultati, riportati in figura 2.11, mostrano come l'efficienza sia sempre compresa tra i valori limite che si ottengono in condizioni di flusso nullo e lama d'acqua. Tuttavia, per i regimi di piogge analizzate dagli autori, l'efficienza non si discosta molto da quella che si otterrebbe in presenza di lama d'acqua.

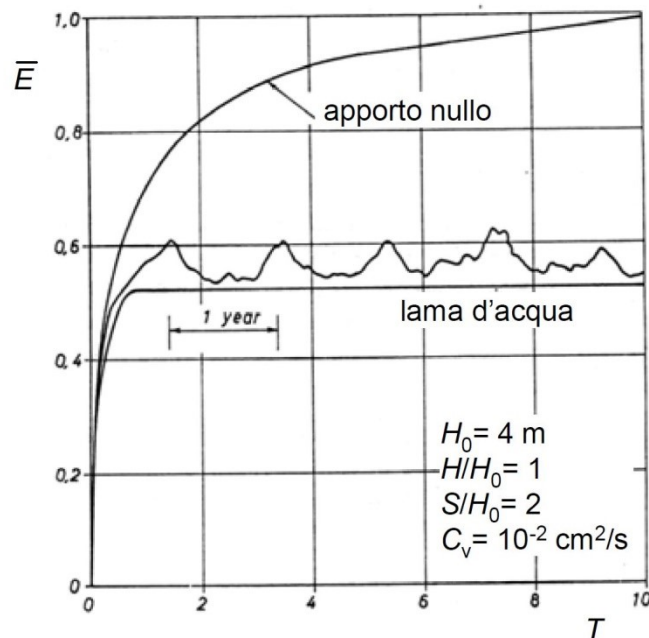


Figura 2.11: evoluzione dell'efficienza nell'ipotesi di flusso intermittente al piano campagna.

2.5.1.2 Condizioni di flusso tridimensionali

Il caso di trincee drenanti in condizioni di flusso tridimensionale è stato studiato da Stanic (1984). Le sue soluzioni fanno riferimento ad un pendio indefinito inclinato, con trincee parallele disposte secondo le linee di massima pendenza. Il sistema raggiunge la superficie limite inferiore ($H=H_0=h$), che viene inoltre considerata come un contorno impermeabile e fatta corrispondere con la superficie di scorrimento. Il mezzo considerato è isotropo nei confronti della permeabilità e la condizione assunta al piano compagna è quella di lama d'acqua. Nel caso tridimensionale vanno assegnate ulteriori condizioni al contorno sulle superfici limite di monte e di valle, su cui l'autore ipotizza flussi nulli e specifica che tale ipotesi è accettabile considerando una lunghezza del dominio pari ad almeno 4 volte l'altezza. In queste condizioni la condizione al contorno non influenza la soluzione nella parte centrale del dominio analizzato. I diagrammi in figura 2.12 forniscono i valori di due parametri adimensionali r_p ed r_M , in funzione dell'interasse tra le trincee S e dell'angolo di inclinazione del pendio β . Essi sono definiti come:

$r_p = P_p / \gamma_w h$ = livello piezometrico medio normalizzato

$r_M = P_M / h$ = livello piezometrico massimo normalizzato.

P_p e P_M sono valori di altezza piezometrica che si ottengono a regime. Considerando la tipica distribuzione di pressione che si ottiene tra due trincee in una sezione verticale del pendio (figura 2.12, sezione B-B): P_p rappresenta l'altezza piezometrica media, P_M rappresenta l'altezza piezometrica massima che si ottiene in corrispondenza della mezzzeria dell'interasse tra le trincee.

Si noti che i parametri introdotti rappresentano l'aliquota di pressione che permane sulla superficie di scorrimento dopo la realizzazione dei drenaggi, in rapporto a quella preesistente. E pertanto si possono facilmente relazionare all'efficienza:

$$r_p = 1 - \bar{E}_\infty$$

$$r_M = 1 - E_{\infty Max}$$

Oltre all'aspetto puramente applicativo, le soluzioni proposte da Stanic mostrano chiaramente l'effetto che ha l'inclinazione del pendio sul comportamento del sistema. Osservando i grafici si nota come, a parità di altri parametri, una variazione dell'angolo compresa tra $0^\circ (tg\beta=0)$ e circa $15^\circ (tg\beta=1/4)$ gradi ha una scarsissima influenza sul livello piezometrico medio normalizzato r_p . Solo per valori di β superiori a $15^\circ (tg\beta > 1/4)$, r_p inizia a ridursi in maniera apprezzabile man mano che l'inclinazione aumenta. Quanto osservato dimostra che l'utilizzo di modelli con piano campagna orizzontale è giustificato solo per alcuni valori dell'angolo di inclinazione dei pendii e che tali modelli forniscono in ogni caso una leggera sottostima dell'efficienza.

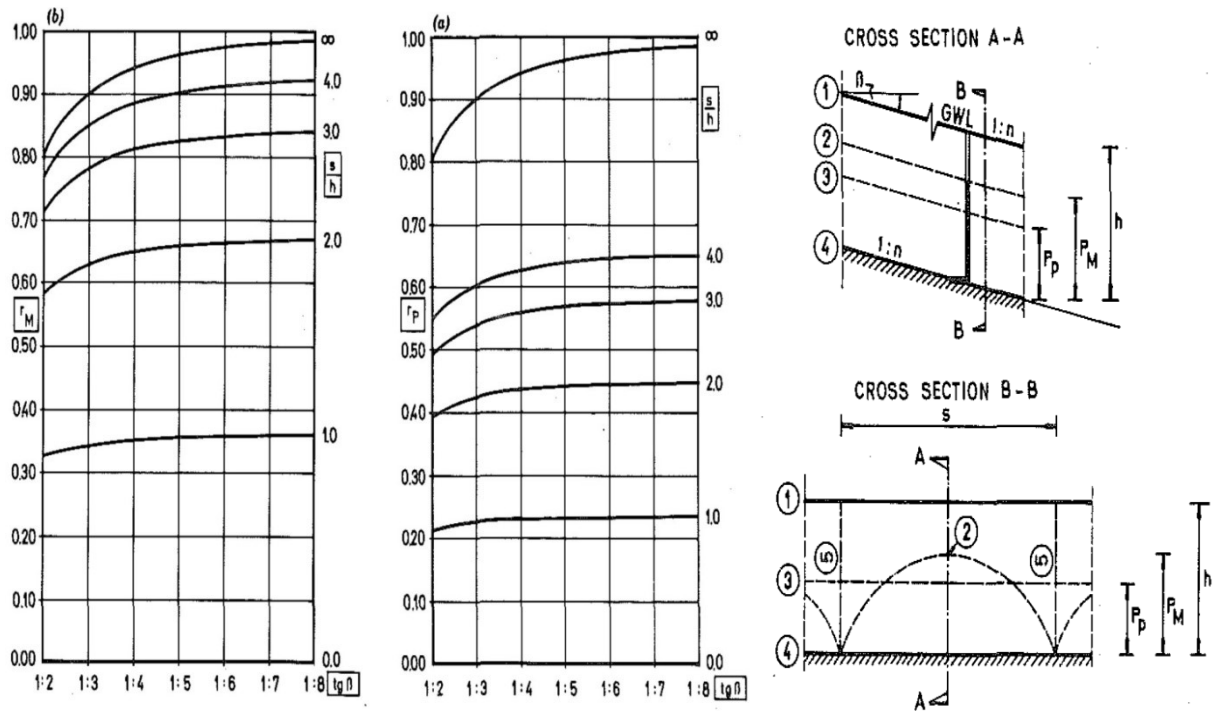


Figura 2.12: abachi di Stanic (1984) per il calcolo del livello piezometrico normalizzato.

Sempre in regime tridimensionale, Pun e Urciuoli (2008) hanno analizzato il caso di trincee drenanti con rami secondari, secondo lo schema di figura 2.13.

Le ipotesi assunte sono: piano campagna orizzontale, terreno omogeneo, apporto continuo con formazione di una lama d'acqua al piano campagna. Sfruttando opportuni piani di simmetria, gli autori fanno riferimento ad un volume di integrazione ridotto (figura 2.13). Le caratteristiche geometriche del volume e delle trincee principali sono simili a quelle adottate nel modello piano da Desideri et al. (1997); l'interasse fra le trincee principali è pari a $2L_y$. Le trincee secondarie hanno la stessa profondità di quelle principali, una lunghezza l_l e sono disposte ad interasse S .

Le soluzioni sono espresse in abachi adimensionali sotto forma di efficienza in funzione di S/H_0 . Ciascuna curva rappresenta differenti lunghezze delle trincee secondarie. Differenti diagrammi tengono conto degli altri parametri (L_y/H_0 , D/H_0 , H/H_0). In figura 2.14 vengono riportati a titolo esemplificativo solo alcuni abachi relativi a differenti profondità adimensionalizzate della superficie di scorrimento D/H_0 avendo fissato L_y/H_0 e H/H_0 .

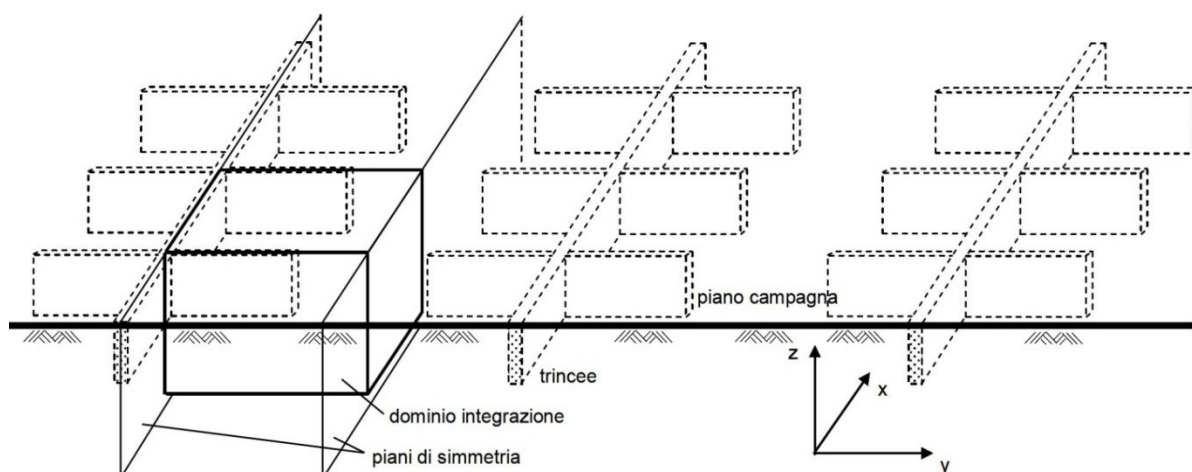


Figura 2.13: dominio di integrazione per il caso di trincee con rami secondari.

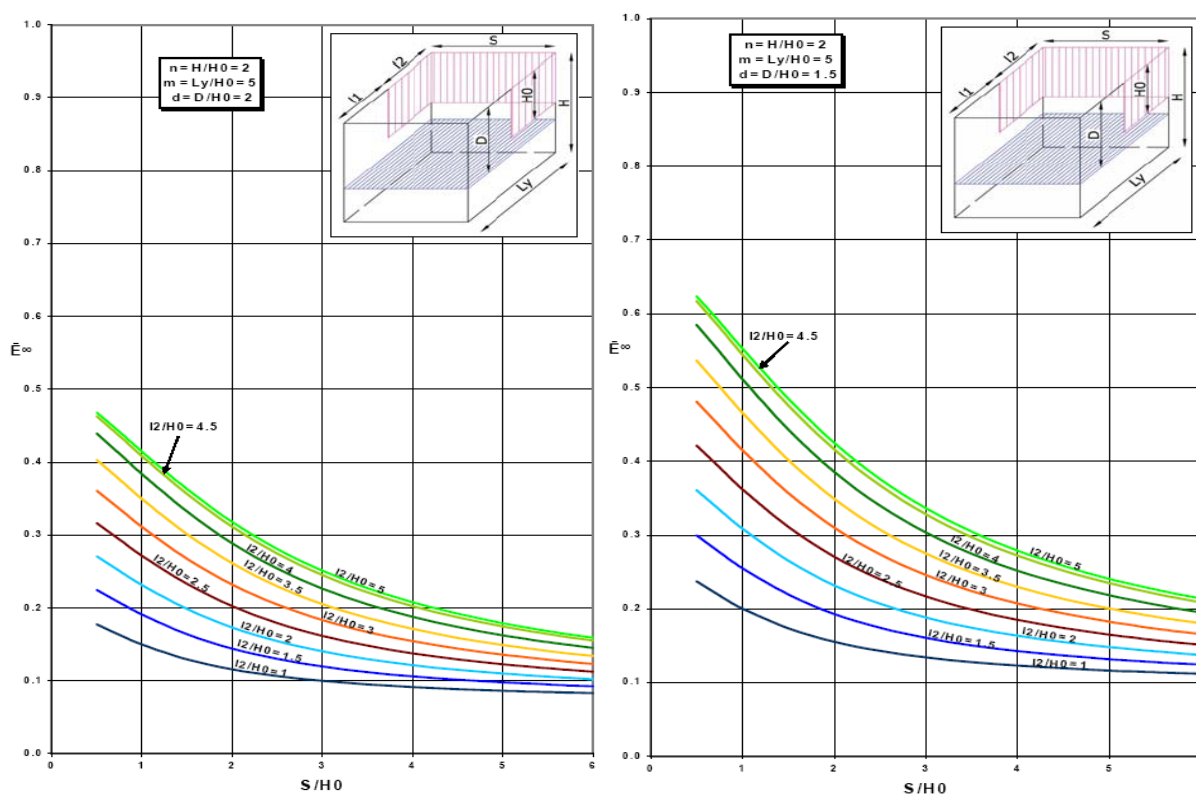


Figura 2.14: efficienza media stazionaria per trincee drenanti con rami secondari, analisi 3D.

2.5.2 Dreni Sub-orizzontali o microdreni

Una sintesi dei lavori sui dreni sub-orizzontali disponibili in letteratura è riportata in tabella 2.3. Anche in questo caso la letteratura offre diverse soluzioni per geometria, modello di terreno, metodo di calcolo, equazioni risolte e condizioni al contorno.

Letteratura	Geometria	Terreno	Metodo adottato	Condizioni	Condizione al bordo superiore
Kenney et al., 1977	3-D	Mezzo poroso omogeneo isotropo	Modello in scala ridotta	-	Lama d'acqua al piano campagna
Noinveller, 1981	3-D	Mezzo poroso omogeneo isotropo	Differenze Finite	Stazionare Transitorie	Lama d'acqua al piano campagna
Nakamura, 1988	2-D	Mezzo poroso omogeneo isotropo	Elementi Finiti	Transitorie	Lama d'acqua al piano campagna
Di Maio et al., 1988	2, 3 -D	Mezzo poroso omogeneo isotropo	Differenze Finite	Transitorie	Lama d'acqua al piano campagna
Desideri et al., 1997	2-D	Mezzo poroso omogeneo isotropo	Differenze Finite	Transitorie	Lama d'acqua al piano campagna
Pun, Urciuoli, 2008	3-D	Mezzo poroso omogeneo isotropo	Differenze Finite	Transitorie	Lama d'acqua al piano campagna

Tabella 2.3: letteratura di riferimento per l'analisi del funzionamento di dreni sub-orizzontali.

2.5.2.1 Condizioni di flusso piane

Data la loro versatilità, la geometria dei sistemi formati da microdreni può essere estremamente variabile. L'adozione di un modello bidimensionale, in questo caso, può essere riferita sia ad un flusso che si sviluppa nel piano trasversale al pendio, sia ad un flusso che si sviluppa nel piano longitudinale.

Se i dreni vengo installati parallelamente al piano campagna e prossimi l'uno all'altro a partire da una superficie trasversale ad esso, ad una certa distanza dalla parete è possibile ipotizzare che il flusso avvenga in condizioni piane (figura 2.15c).

Una modellazione di questo tipo è stata proposta da Burghignoli e Desideri (1987). Le ulteriori ipotesi considerate dagli autori sono l'anisotropia del mezzo nei confronti della permeabilità e l'ipotesi di superficie libera. I parametri introdotti sono:

$$m = \frac{\gamma_w \cdot H_d}{n_e} \cdot \frac{2(1 + \nu') \cdot (1 - 2\nu')}{E'}$$

$$r = \frac{q}{k_v}$$

$$T = \frac{k_v \cdot H_d}{n_e} \cdot t$$

$$g = \left(\frac{2H_d}{i} \cdot \sqrt{\frac{k_h}{k_v}} \right)^2$$

Dove:

H_d = profondità dei dreni dal piano campagna;

i = interasse tra i dreni.

Alcuni risultati di questo studio vengono riportati da Desideri e Rampello (2009). In particolare gli andamenti dell'efficienza in funzione del fattore di tempo sul piano passante per la base dei dreni. In figura 2.15a si apprezza l'effetto dell'anisotropia e della geometria del sistema attraverso diversi valori del parametro g , avendo fissato il parametro m . Le curve mostrano che il processo risulta più veloce al crescere dei rapporti H_d/i e K_h/k_v . La figura 2.15b mostra, invece, l'effetto del tipo di materiale attraverso la variazione del parametro m , a parità di g .

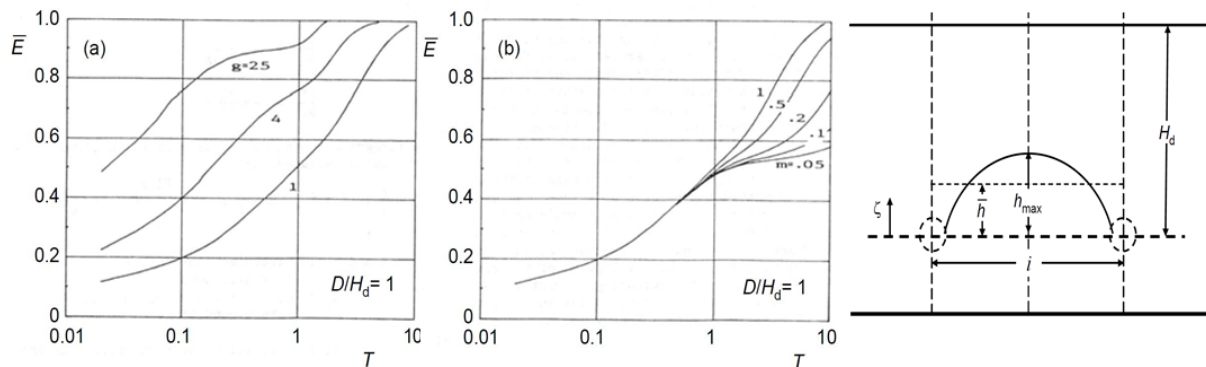


Figura 2.15: effetto di g ed m sull'evoluzione dell'efficienza (Burghignoli e Desideri, 1987).

Di Maio et al (1988) hanno dimostrato che, se il rapporto tra l'interesse fra i dreni nel piano sub-orizzontale che li contiene, e la loro lunghezza, è inferiore ad un valore di soglia pari a 0.2, essi possono essere trattati come un piano drenante a pressione nulla. In queste condizioni è possibile condurre analisi di filtrazione in condizioni di flusso piane, considerando una sezione longitudinale del pendio.

Partendo da queste considerazioni, Desideri et al. (1997) hanno studiato il processo di drenaggio indotto da un sistema di dreni sub-orizzontali, con riferimento ad una porzione di pendio indefinito (figura 2.16).

I dreni partono dal piano campagna e sono posti ad una distanza S nella direzione di massima pendenza. L'interasse i è ipotizzato pari a 0 (piani drenanti). Il rapporto d/l tra diametro e lunghezza è costante e pari a 0.02. Il terreno è ipotizzato omogeneo e isotropo nei confronti

della permeabilità. La condizione iniziale prevede falda al piano campagna con flusso parallelo ad esso.

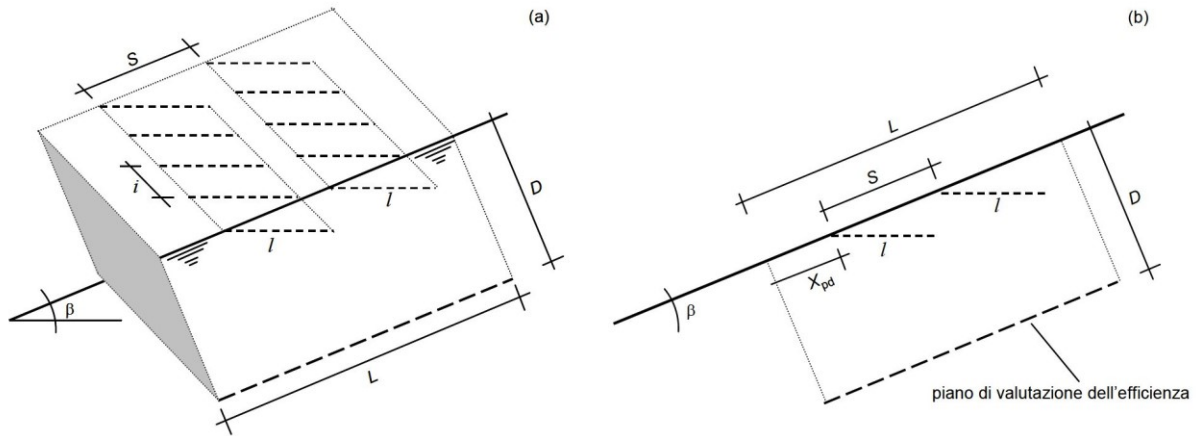


Figura 2.16: schema geometrico per un sistema di dreni sub-orizzontali analizzato da Desideri et al., 1997.

La condizione assunta sul bordo superiore durante il processo è la lama d'acqua. Il bordo inferiore e le superfici che delimitano il dominio a monte e a valle sono ipotizzati ad una distanza tale da non influenzare il regime idraulico in prossimità dei dreni. Sul bordo inferiore, considerato impermeabile, viene assegnato un flusso nullo; sui piani di monte e di valle viene assegnata una quota piezometrica costante, corrispondente alle condizioni di moto preesistente.

Gli autori valutano l'efficienza idraulica del sistema su un piano di lunghezza L posto ad una profondità D . Il primo piano drenante parte dal piano campagna, ad una distanza relativa X_{pd} rispetto al tratto L . Avendo prefissato l'interesse tra i dreni ed il diametro, l'efficienza dipende solo dai rapporti l/L , X_{pd}/L , S/L e dall'inclinazione del pendio β .

Per il caso di un singolo livello di dreni, il primo parametro indagato è la posizione relativa X_{pd} . In particolare, in figura 2.17a vengono riportati i valori di X_{pd}/L , per i quali si ottiene il massimo valore dell'efficienza media stazionaria, al variare della configurazione geometrica. Una volta analizzata la posizione relativa che ottimizza il processo, l'efficienza viene riportata in funzione dei rapporti l/L e D/L (figura 2.17b). Il tempo necessario a raggiungere il 50% ed il 90% dell'efficienza a regime è espresso nelle figure 2.17c 2.17d sempre in funzione di l/L e D/L , in termini di fattore di tempo:

$$T = \frac{k_v}{\gamma_w (l \sin \beta)^2} \cdot \frac{E'}{2(1 + \nu') \cdot (1 - 2\nu')} t$$

Per il caso di un doppio livello di dreni gli autori procedono in maniera analoga. Stavolta l'efficienza viene ottimizzata sia in funzione di X_{pd} che di S , in seguito riportata in funzione di I/L e D/L (figura 2.18).

Le analisi sono state ripetute per due valori dell'angolo di inclinazione del pendio ($\beta=20^\circ$, $\beta=30^\circ$). Di seguito vengono riportate le soluzioni ottenute dagli autori per il caso $\beta=20^\circ$.

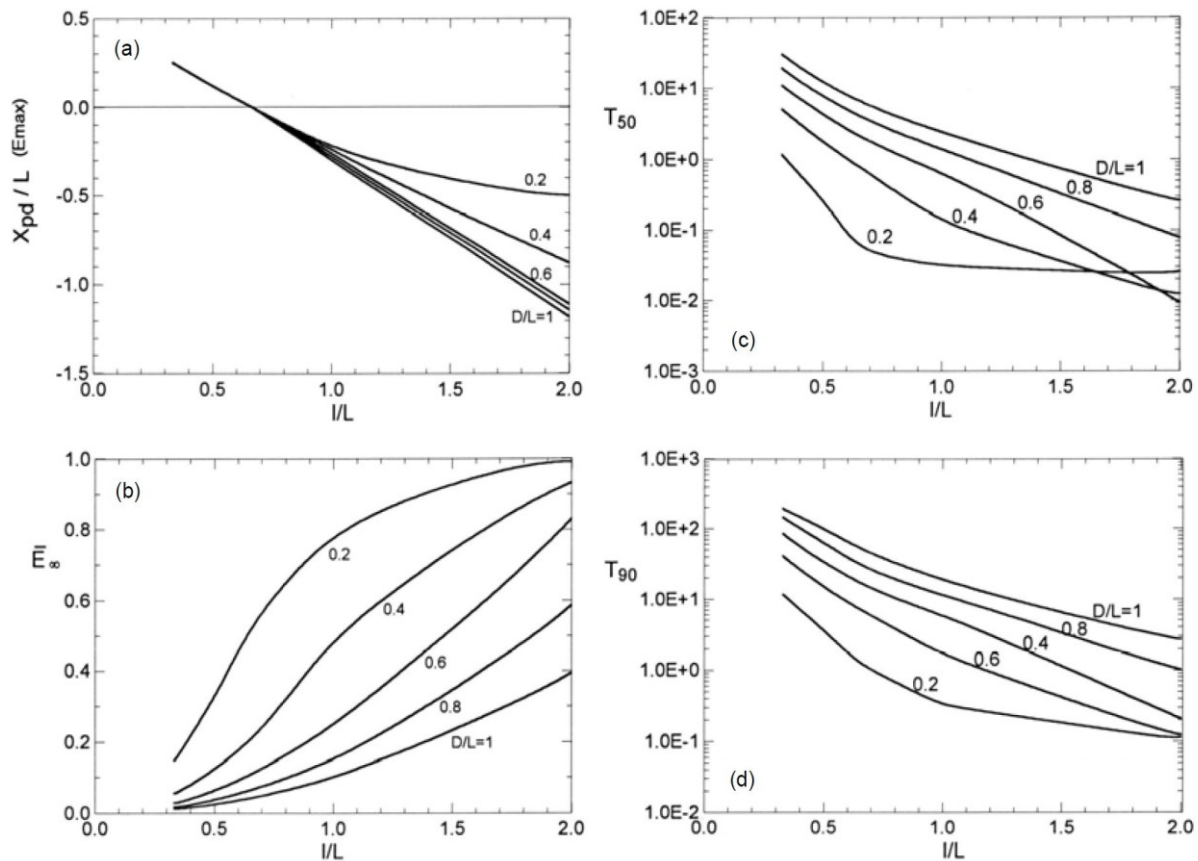


Figura 2.17: singolo livello di dreni: a) posizione relativa ottimale; b) efficienza media a regime; c) fattore tempo T_{50} ; d) fattore tempo T_{90} ; (Desideri et al., 1997).

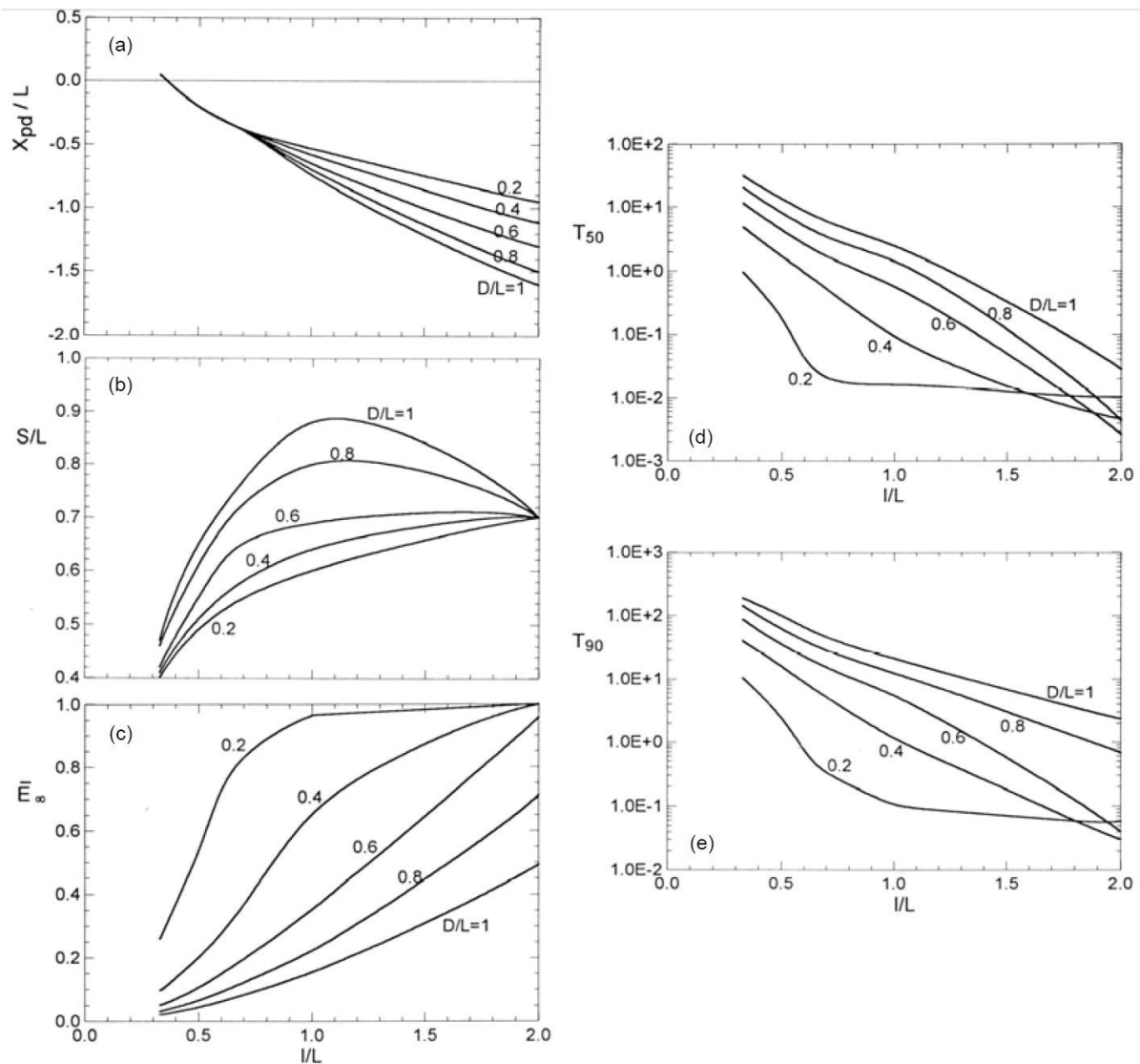


Figura 2.18: doppio livello di dreni: a) posizione relativa ottimale; b) distanza tra i due livelli di dreni misurata sul piano campagna; c) efficienza media a regime; d) fattore tempo T_{50} ; e) fattore tempo T_{90} (Desideri et al., 1997).

2.5.2.2 Condizioni di flusso tridimensionale

La modellazione dei dreni in condizioni piane è consentita solo in casi particolari. In condizioni più generali il regime idraulico è caratterizzato da significative variazioni di flusso, sia nel piano ortogonale che in quello trasversale al pendio. In queste condizioni di norma il processo di drenaggio va analizzato con modelli tridimensionali. Studi di questo tipo sono stati realizzati da Kenney (1977), Novellier (1981) e Di Maio (1988).

Il primo autore propone degli abachi ottenuti sulla base di sperimentazioni in laboratorio, effettuate su modelli in scala ridotta costituiti da micro-sfere di vetro, rappresentative di un terreno omogeneo e isotropo. I due schemi considerati prevedono entrambi un singolo livello di dreni, disposti al piede del pendio. Il bordo inferiore è impermeabile e infinitamente

resistente. Esso viene disposto in un caso a una profondità tale da non influenzare la stabilità della scarpata, nell'altro al piede della stessa. Il moto è confinato per effetto di livelli piezometrici ipotizzati costanti sulle superfici laterali. Sul piano campagna non viene assegnato alcun flusso. Il sistema è stato integrato con la possibilità di misura diretta delle pressioni neutre prima e dopo la realizzazione dei dreni. Negli abachi, gli autori riportano l'incremento del fattore di sicurezza $\Delta F/F_0$ calcolato con il metodo di Bishop semplificato. Vengono valutati: l'effetto della spaziatura S , della lunghezza L , del numero n di dreni, della lunghezza totale $n \cdot L$ dei dreni, della lunghezza dei dreni per unità di larghezza del pendio $n \cdot L/\Sigma S$. In figura 2.19 vengono riportati i risultati relativi al caso di bordo inferiore posto ad elevata profondità.

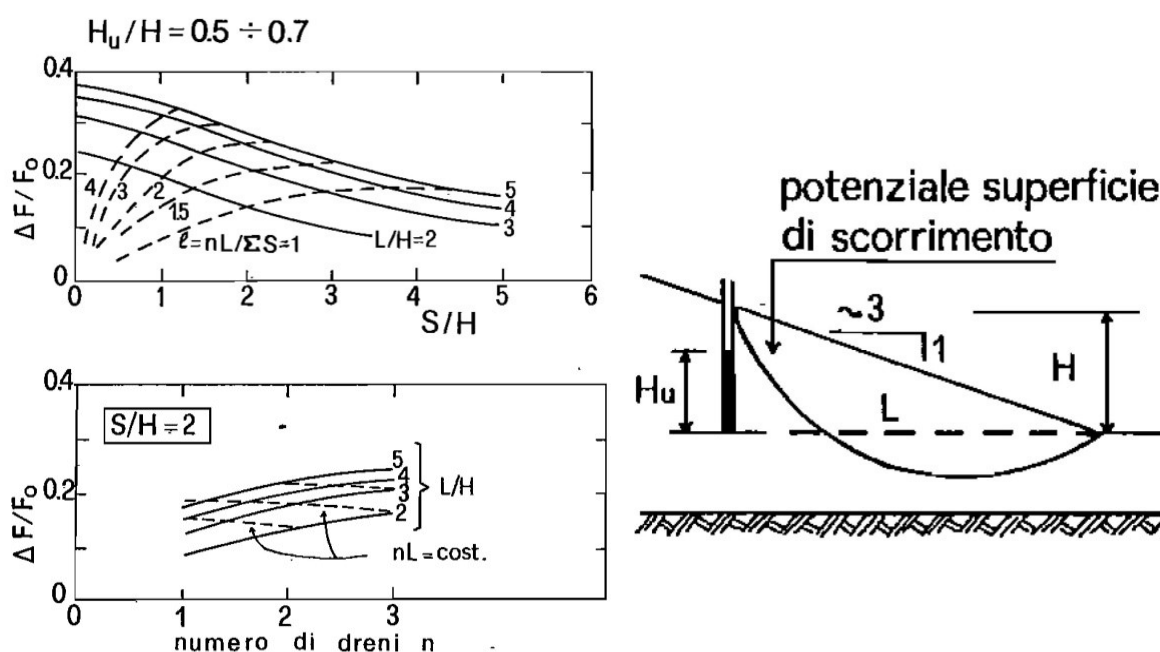


Figura 2.19: Incremento del fattore di sicurezza per un singolo livello di dreni (Kenney, 1977).

Novellier (1981) ha analizzato il processo di drenaggio indotto dai dreni integrando l'equazione differenziale di Terzaghi-Rendulic con un metodo alle differenze finite. Le condizioni iniziali sono quelle stazionarie che si ottengono dall'applicazione dei livelli piezometrici riportati in figura 2.20 e dalla presenza di un apporto di acqua continuo al piano campagna, con la formazione di una lama d'acqua. Le soluzioni sono riportate in termini di rapporto tra il fattore di sicurezza a regime e quello iniziale FS_{∞}/FS_0 . Mentre l'evoluzione del processo è espressa dal rapporto $Fg = (FS_{\infty} - FS)/(FS_{\infty} - FS_0)$, dove FS è il valore del fattore di sicurezza durante la fase di moto vario.

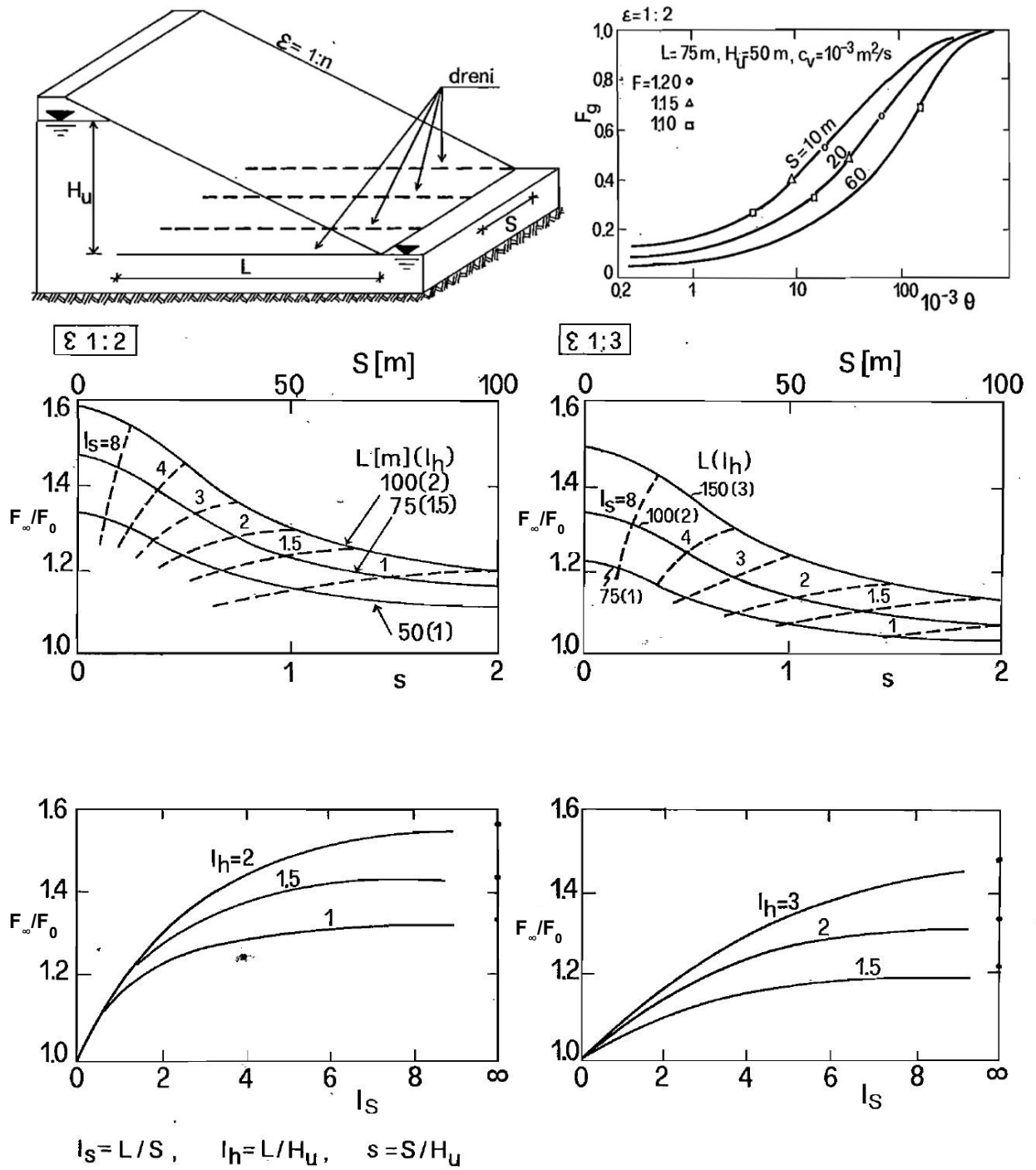


Figura 2.20: Soluzioni di Novellier (1981) per un livello di dreni installato al piede di un pendio.

2.5.3 Pozzi Drenanti

Sebbene la progettazione dei pozzi drenanti di piccolo e medio diametro sia abbastanza diffusa, la ricerca bibliografica ha messo in luce pochissimi riferimenti circa i metodi usati per il dimensionamento di tali opere.

2.5.3.1 Procedura di progetto per il sistema RODREN

Fra le procedure più diffuse per la progettazione dei pozzi di medio o piccolo diametro si annovera quella proposta dalla RODIO S.p.A, proprietaria del brevetto RODREN. Tale metodo viene di seguito riportato integralmente e prevede tre fasi, nelle quali:

- a) si valuta la potenzialità dei singoli pozzi drenanti basandosi sulle teorie classiche dell'idraulica del sottosuolo;*
- b) in base ai risultati ottenuti, che sono comunque da confermare con metodi più affidabili e sofisticati, compresa la sperimentazione in campo prove, si verifica se l'interasse prescelto sia sufficiente per un ampio intercettamento dei flussi idrici sotterranei;*
- c) si esegue infine una stima degli abbattimenti di pressione neutra realizzabili.*

Si è detto che in prima istanza la potenzialità drenante del singolo pozzo può essere stimata utilizzando le formule classiche dell'idraulica dei mezzi porosi. L'abaco in figura 2.21 mostra la variazione di portata massima emungibile, in funzione del coefficiente di permeabilità, per diversi valori del rapporto $D/\Delta H$, tra lo spessore complessivo degli strati permeabili ($K \geq 10^{-3}$ cm/sec) e la massima depressione ottenibile.

Lo schema proposto può essere applicato per verificare che, in base all'interasse prescelto, risulti una portata in ciascun pozzo non superiore al valore massimo potenziale:

$$Q_w = h \cdot K \cdot D \cdot f(a, L, r_w);$$

con lo stesso schema si possono stimare le quote piezometriche tra i pozzi e a valle di questi:

$$h = Q_w / [K \cdot D \cdot f(a, r_w)].$$

Per il significato dei simboli si rimanda alla figura 2.21.

Il valore ottenuto può essere confrontato con l'abbassamento richiesto all'opera derivante dalle analisi di stabilità del pendio.

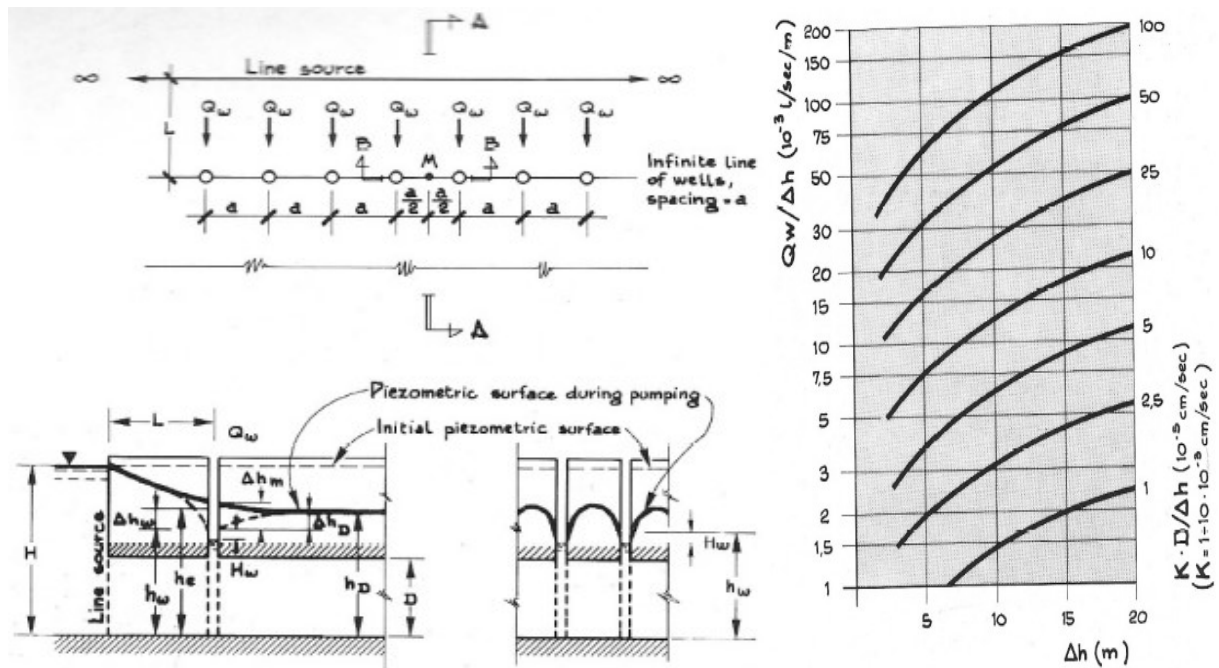


Figura 2.21: schema di progettazione per il sistema di pozzi di medio diametro RODREN.

2.5.3.2 Formule dell'idraulica dei mezzi porosi

La letteratura scientifica di discipline come Idrogeologia e Ingegneria del petrolio è ricca di contributi relativi al funzionamento dei pozzi. È molto comune, nell'ambito del progetto di pozzi drenanti per la stabilizzazione dei pendii, fare riferimento ad alcune di queste soluzioni. Fra le più utilizzate e più semplici vi è la soluzione di Dupuit-Forchheimer che, nelle ipotesi di mezzo omogeneo e isotropo, assial-simmetria e superfici equipotenziali verticali, permette di correlare il livello piezometrico h ad una certa distanza r dal pozzo, con la portata Q emunta dal pozzo (figura 2.22):

$$H^2 - h^2 = \frac{Q}{\pi \cdot k} \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right)$$

Questa soluzione, come altre che da essa discendono, fornisce risultati accettabili, da un punto di vista pratico, per quanto riguarda la progettazione di un pozzo con funzione di emungimento. Tuttavia, le ipotesi alla base di queste soluzioni appaiono insufficienti se l'obiettivo è dimensionare un sistema con funzione drenante. Infatti, in un pendio indefinito il problema non può essere geometricamente riducibile ad un caso assialsimmetrico; le superfici isopieziche non possono essere considerate verticali, ed entrambe le ipotesi sono tanto meno rigorose quanto maggiore è l'inclinazione del pendio. Inoltre, in un pendio sede di un processo di drenaggio, il regime di flusso che si instaura in presenza di piogge è prevalentemente verticale.

In ogni caso, l'utilizzo di queste soluzioni si rende necessario nell'interpretazione delle prove di pompaggio in sito, che rappresentano una componente indispensabile nella caratterizzazione idraulica del terreno.

Oltre alla discutibilità delle ipotesi, esistono ulteriori problemi nell'applicazione delle formule dell'idraulica dei mezzi porosi al progetto dei drenaggi. In particolare la necessità di assegnare una portata ed un raggio di influenza, che non sono note apriori ma dipendono dal funzionamento del sistema di pozzi. Tali parametri risultano di scarso interesse mentre ciò che realmente interessa è la distribuzione delle pressioni neutre.

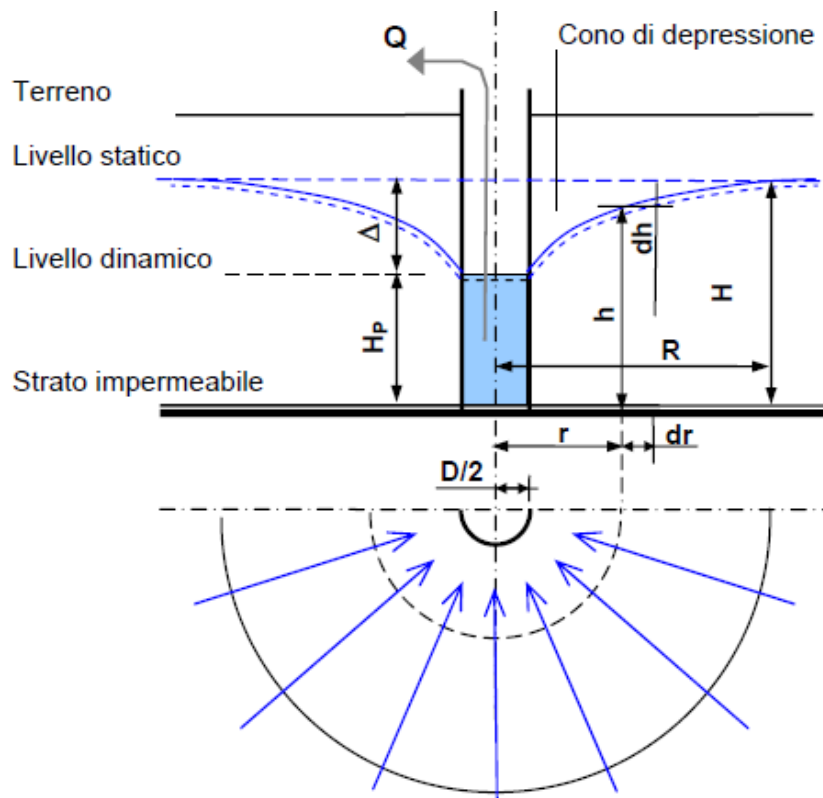


Figura 2.22: schema geometrico utilizzato per il calcolo della portata emungibile da un pozzo in falda freatica.

2.5.3.3 Analisi numerica piana con sezione drenante equivalente

A differenza di altre tecnologie di drenaggio come trincee e microdreni, dall'analisi di letteratura, non sono emersi contributi relativi al funzionamento ed al progetto dei pozzi. In particolare è emersa l'assenza di studi parametrici per analizzare, sia quantitativamente che qualitativamente, il funzionamento del sistema.

Uno studio del genere è stato effettuato da Aloï (2012) considerando la geometria di progetto illustrata in figura 2.23.

Viene analizzato il comportamento di un sistema di pozzi sfruttando l'accoppiamento tra due modelli bidimensionali. Lo schema principale è quello che si sviluppa nella sezione longitudinale del pendio. Il problema di filtrazione in questo piano, viene analizzato ipotizzando che la fila di pozzi sia rappresentata da una sezione drenante.

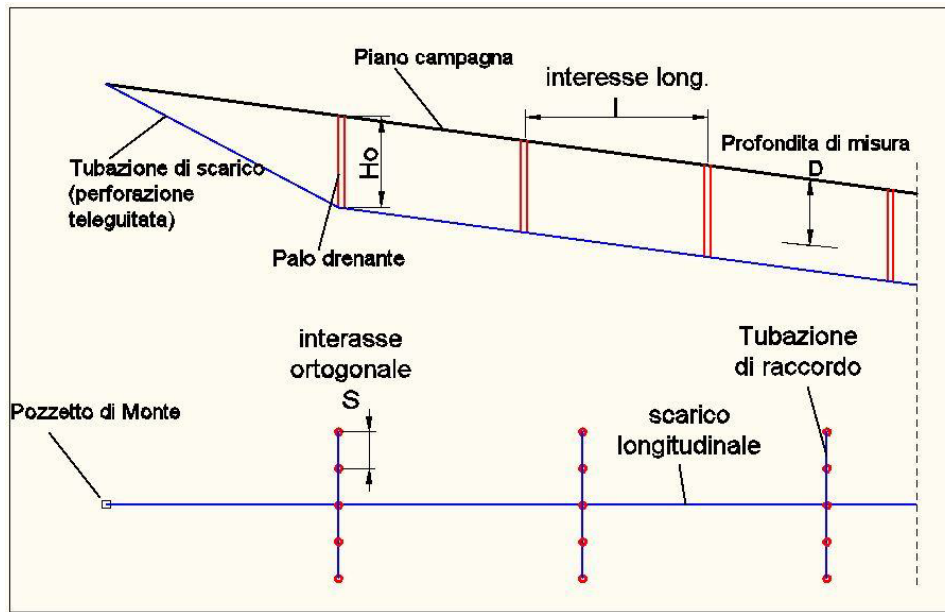


Figura 2.23: schema di intervento con pozzi drenanti (Aloi et al., 2012).

Mentre nel caso di trincee drenanti disposte ortogonalmente al pendio, tale tipo di approccio è perfettamente applicabile, per quanto riguarda un intervento con pozzi drenanti, il funzionamento è chiaramente tridimensionale. Trascurare la componente di flusso nella sezione trasversale rispetto al pendio determinerebbe un errore nel calcolo delle efficienze idrauliche del sistema di drenaggio. Infatti, nel caso di pozzi drenanti, la distribuzione di pressioni neutre lungo la direzione trasversale è tutt'altro che uniforme (figura 2.24): la pressione è nulla in corrispondenza del pozzo, ma ha un andamento di tipo parabolico in direzione trasversale tra due pozzi contigui, posti all'interasse s .

Una modellazione piana in questo caso, quindi, a rigore non potrebbe essere applicata, poiché la distribuzione di pressioni non è uniforme, né si ripete allo stesso modo nella direzione trasversale, ed esiste, quindi, una componente di flusso diversa da zero in tale direzione. Per tenere conto di questa componente di flusso, che non può essere assolutamente trascurata, viene effettuato un "escamotage", consistente nell'assegnare una particolare condizione al contorno su tutto il piano passante per la fila di pozzi.

Si considera il piano passante per la base dei pozzi, viene valutato il valore di pressione medio u^* lungo l'interasse s tra due pozzi; questo valore u^* viene utilizzato per costruire una distribuzione di pressioni neutre (figura 2.24) che va da zero in corrispondenza del piano campagna ad u^* in corrispondenza della base dei pozzi, a profondità H_0 ; la distribuzione di pressioni viene scelta con andamento lineare, e viene utilizzata come condizione da assegnare al bordo lungo la superficie di contatto opera/terreno nello schema longitudinale. In questo modo la direzione trasversale viene modellata come un *piano drenante equivalente* (figura 2.25), supponendo che la condizione al bordo si riproduca egualmente per tutti i piani paralleli al piano longitudinale. Ci si riconduce così ad una modellazione piana.

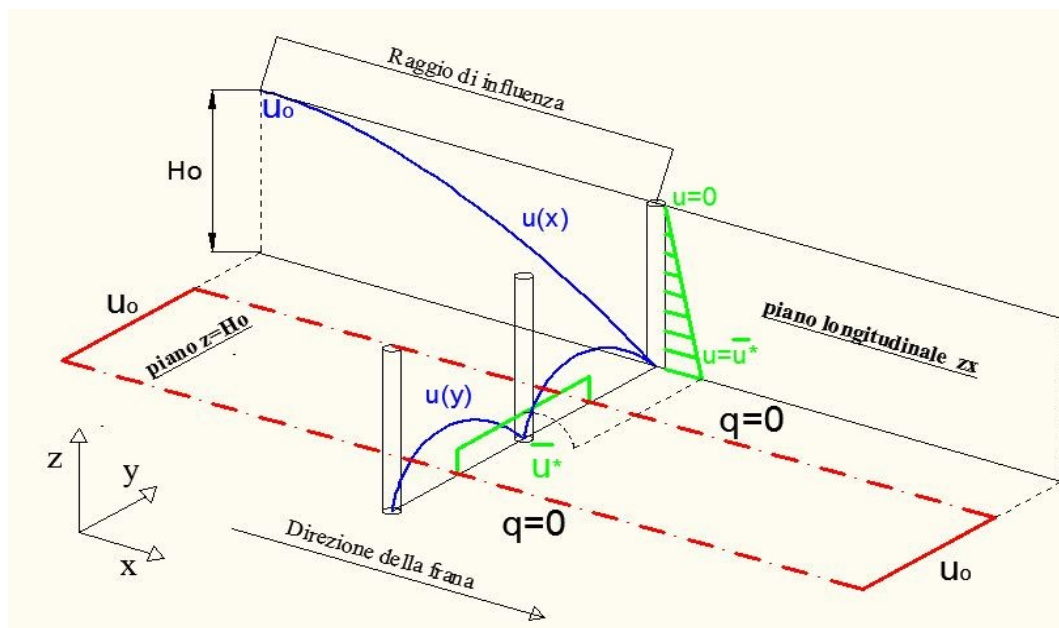


Figura 2.24: schema di sezione drenante equivalente.

Relativamente alle altre superfici di contorno nello schema longitudinale, le condizioni applicate sono:

- formazione di una lama d'acqua al piano campagna: $u=0$;
- superficie impermeabile sul piano inferiore ad una profondità H : $q=0$;
- quota piezometrica costante per tutti i punti appartenenti ai bordi di monte e di valle, pari in ciascuna sezione alla quota geodetica del punto posto in superficie.

Il valore u^* necessario per costruire la *sezione drenante equivalente* viene valutato effettuando ulteriori analisi di filtrazione 2D *in pianta*, nel piano parallelo al piano campagna, passante per la base dei pozzi. Lo schema di calcolo è mostrato in figura 2.26:

Le dimensioni del dominio sono pari all'interasse s nella direzione trasversale, ed il raggio di influenza r_w nella direzione longitudinale. Il diametro del pozzo assume valore costante pari a $0,06H_0$. Su contorni del dominio vengono considerate le seguenti condizioni:

- flusso $q=0$ lungo i piani di simmetria;
- pressione $u=0$ in corrispondenza dell'interfaccia pozzo drenante/terreno;
- altezza piezometrica $u/\gamma = H_0$ ad una distanza dal pozzo coincidente con il raggio di influenza, dove si ristabiliscono le condizioni indisturbate.

Il valore medio di pressione u^* alla profondità H_0 è stato calcolato in riferimento ai punti evidenziati in blu (figura 3.26).

In definitiva, in un modello 2D l'analisi viene sdoppiata su due piani ed elaborata separatamente per ciascuno di essi.

Le analisi vengono condotte in riferimento alla condizione stazionaria, relativa ad un tempo t tendente all'infinito, ed elaborate con il software FEM GeoStudio 2007 – SEEP/W, che consente la modellazione in regime bidimensionale. Le soluzioni ottenute, sono riportate in abachi adimensionali che forniscono l'efficienza in funzione di: profondità delle superficie di scorrimento D , interasse tra i pozzi nella direzione ortogonale al pendio S , dell'interasse nella direzione longitudinale del pendio i e della profondità del substrato impermeabile H figura (2.27).

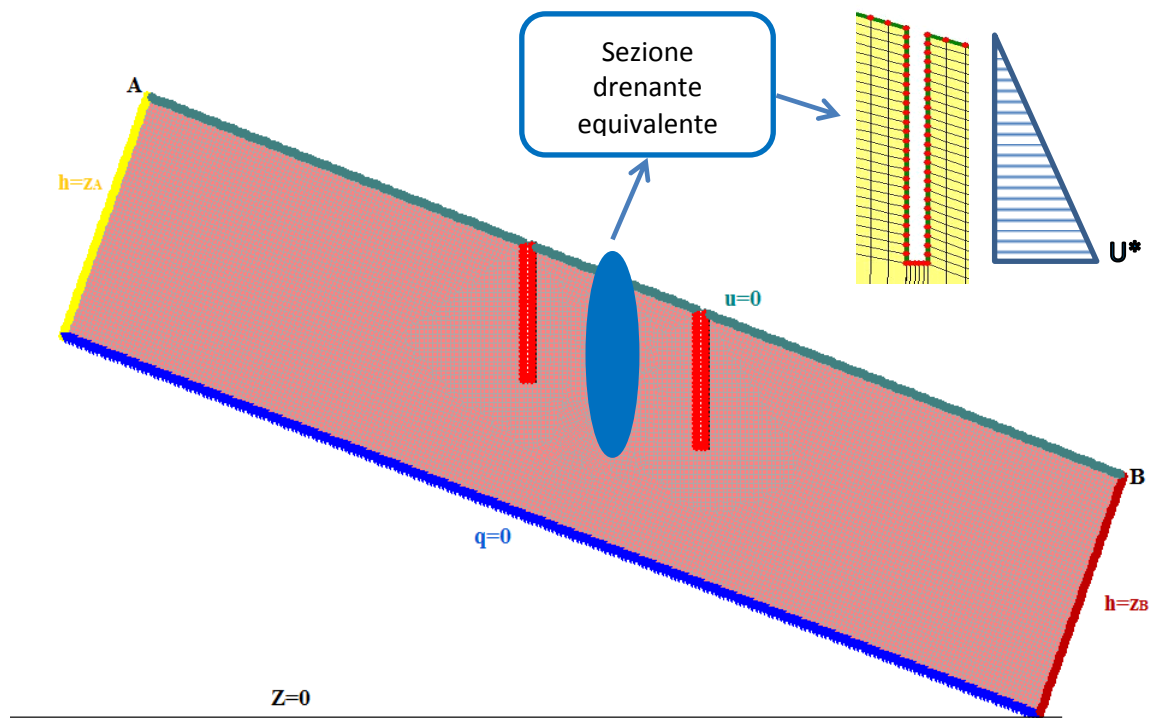


Figura 2.25: schema longitudinale e condizioni al contorno considerato da Aloï (2012).

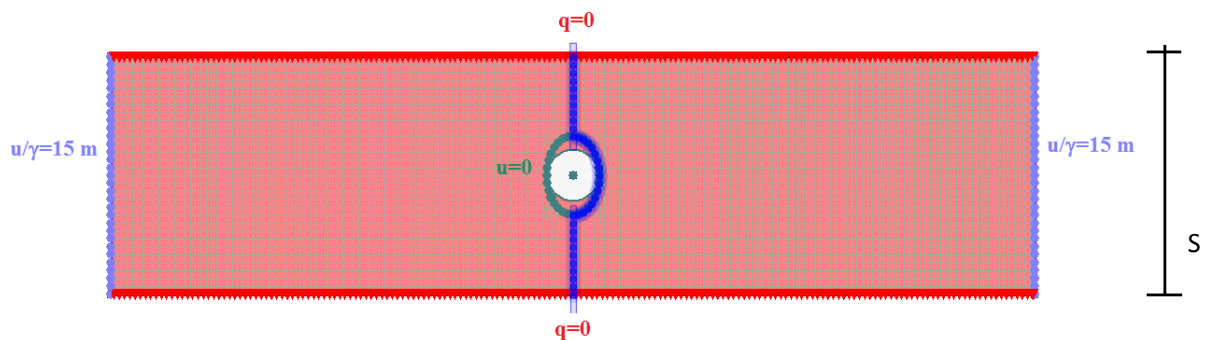


Figura 2.26: analisi in pianta per il calcolo di u^* .

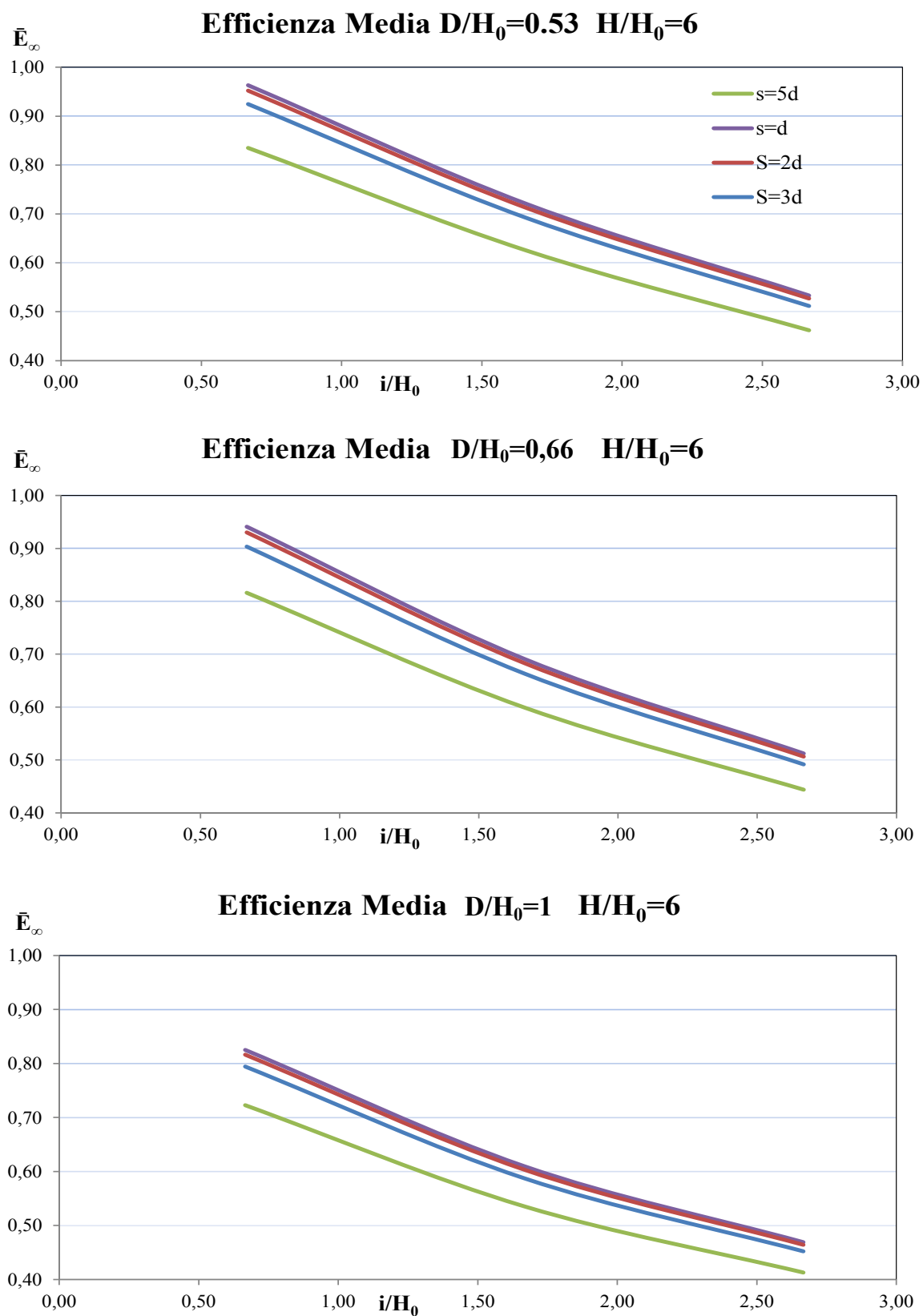


Figura 2.27: abachi per il progetto di pozzi drenanti (Aloi 2012).

Lo studio mette in risalto che per interassi modesti (2-3 volte il diametro) il comportamento del sistema di pozzi drenanti è assimilabile a quello della trincea. In particolare, in figura 2.28, è diagrammata l'efficienza in funzione del volume di scavo del pozzo, adimensionalizzato rispetto a quello della trincea a parità di tutti gli altri parametri geometrici. Realizzando una fila di pozzi ad interasse pari a 3 volte il diametro, e quindi scavando una quantità di materiale pari a circa il 25% di quello necessario a realizzare una trincea continua, si verifica una riduzione dell'efficienza di appena il 2%. Inoltre dalla stessa figura si osserva che la superficie drenante dei pozzi ad interasse pari a 3d è il 60% circa di quella relativa alla trincea.

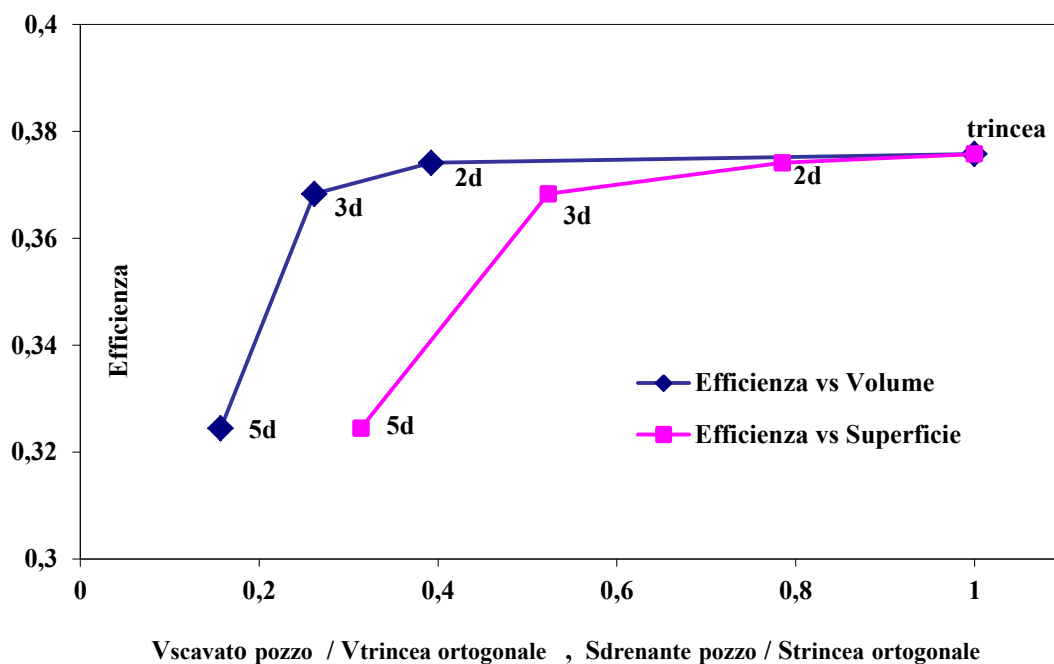


Figura 2.28: efficienza calcolata sulla superficie piana a 15 m di profondità, al variare dell'interasse fra i pozzi, in funzione di: a) volume scavato per la realizzazione del pozzo rispetto al volume scavato per la trincea; b) superficie drenante del pozzo rispetto alla trincea. (Aloi, Pirone, Urciuoli, 2013).

2.6 Alcune considerazioni sul progetto dei drenaggi con l'ipotesi di lama d'acqua al piano campagna

Come ampiamente descritto, la geometria di un sistema drenante può essere facilmente progettata utilizzando le soluzioni semplificate riportate in questo capitolo. In particolare quelle più comunemente utilizzate si basano sull'ipotesi di lama d'acqua al piano campagna. La diffusione di tale approccio, deriva dal fatto che esso permette di stimare l'efficienza a regime dell'opera prescindendo dalla caratterizzazione del terreno. Per quanto riguarda la

fase transitoria, esso richiede esclusivamente la conoscenza del coefficiente di consolidazione, quest'ultimo facilmente ricavabile da prove di consolidazione edometriche.

Nonostante la semplicità delle soluzioni, fornite in abachi adimensionali, basate sull'ipotesi di lama d'acqua, permangono alcuni dubbi su quale debba essere la procedura progettuale. Con riferimento, ad esempio, agli abachi di Desideri (descritti al §3.5.1.1) per il dimensionamento delle trincee drenanti, ci si è posti il problema della loro applicazione in condizioni più generali di falda posta ad una profondità non nulla.

Si consideri la geometria in figura 2.29. Si vuole stabilizzare una frana la cui superficie di scorrimento, parallela al piano campagna, e posta ad una profondità D pari a 7 metri. Il substrato impermeabile si trova ad una distanza tale da non influenzare il moto di filtrazione. La falda, considerata in condizioni idrostatiche, si trova inizialmente ad una profondità z_w pari a 2 metri. La profondità massima raggiungibile dalle trincee, per motivi tecnologici, è fissata a 6 metri. Si vuole dimensionare l'interasse s tale da garantire un livello piezometrico medio, sulla superficie di scorrimento, pari a 3 metri (il termine "falda di progetto" in figura 2.29 ha la sola funzione di aiutare il lettore dal punto di vista della comprensione geometrica. Dal momento che, nelle condizioni di flusso verticale che si instaurano, non ha alcun senso parlare di livello di falda, esso è da intendersi come il livello piezometrico che grava sulla superficie di scorrimento).

Data la definizione di efficienza media stazionaria richiesta all'opera:

$$\bar{E}_\infty = \frac{u_0 - u(\infty)}{u_0}$$

ci si chiede quale sia il valore iniziale u_0 della pressione interstiziale da dover utilizzare: se si può considerare il valore di u_0 derivante dal monitoraggio reale della falda (tabella 2.4 caso a) o se bisogna considerare la falda al piano campagna per uniformarsi all'ipotesi di lama d'acqua (tabella 2.4 caso b) su cui si basano le soluzioni a cui si fa riferimento.

Allo scopo di chiarire i differenti approcci, in tabella 2.4 (a,b) vengono riportate entrambe le ipotesi progettuali e i relativi calcoli. Come si può notare, considerando la reale posizione della falda in luogo di una falda al piano campagna si richiede una efficienza minore al sistema (40% contro 57%) di trincee che, a parità di altri parametri, conduce a un valore dell'interasse di progetto molto più grande (21,72 contro 12,36 metri). Sebbene un risultato del genere fosse quasi scontato, a parere dello scrivente la differenza che si ottiene è dovuta ad un errore concettuale dell'approccio a).

Infatti dal punto di vista della modellazione matematica del problema, la posizione della falda iniziale rappresenta uno dei contorni del modello. In particolare quello sul quale si applica una condizione di pressione neutra nulla. Se si vuole considerare il livello reale della falda, esso deve essere considerato come superficie limite superiore del dominio di integrazione, e

tutto ciò che succede al di sopra di tale superficie non ha alcun effetto sul processo di filtrazione. Questa condizione equivale a considerare una geometria modificata (tabella 2.4 caso c), in cui il piano campagna viene spostato, verso il basso, allo stesso livello della falda. Tutte le quantità geometriche intese come profondità (H_0 , D , H) devono essere riferite al nuovo piano campagna e possono essere considerate come “profondità immerse”.

Con l’approccio che qui viene suggerito, l’efficienza richiesta all’opera rimane la stessa (40%) del caso a), in quanto dipende dal valore delle pressioni neutre iniziali, misurate sulla superficie instabile, e quelle di progetto indipendenti dal tipo di approccio utilizzato. La variazione del dominio di integrazione e quindi dei suoi parametri conduce ad un interasse (13,44 metri) molto più prossimo a quello del caso b) che a quello del caso a).

Si può quindi concludere che l’approccio a) sia del tutto da scartare in quanto fisicamente inammissibile. L’approccio con falda al piano campagna risulta sempre più cautelativo e può essere applicato indipendente dal monitoraggio della falda. Infine, l’approccio suggerito, fornisce risultati più realistici e ed è sicuramente opportuno se associato a dati di monitoraggio.

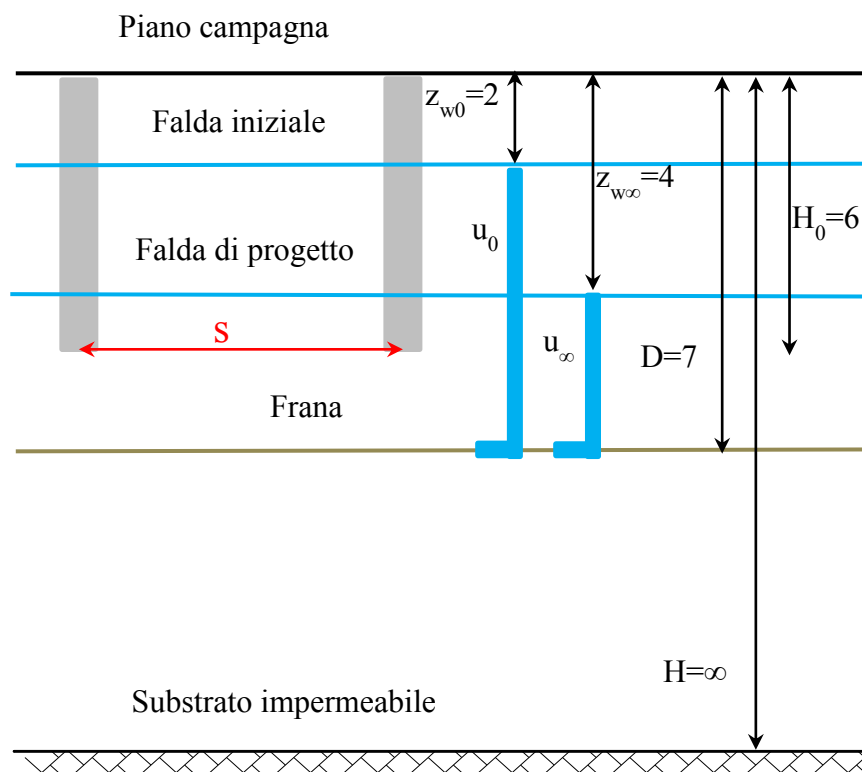


Figura 2.29: schema pratico per il progetto di trincee con gli abachi di Desideri et al (1997).

a) falda reale	b) falda a piano campagna	c) approccio suggerito
$\bar{E}_\infty = \frac{5-3}{5} = 40\%$	$\bar{E}_\infty = \frac{7-3}{7} = 57,1\%$	$\bar{E}_\infty = \frac{5-3}{5} = 40\%$
$\frac{D}{H_0} = \frac{7}{6} = 1,16$	$\frac{D}{H_0} = \frac{7}{6} = 1,16$	$\frac{D}{H_0} = \frac{5}{4} = 1,25$
$s/H_0 = 3,62 \rightarrow s = 21,72$	$s/H_0 = 2,06 \rightarrow s = 12,36$	$s/H_0 = 3,36 \rightarrow s = 13,44$

Tabella 2.4: confronto tra i possibili approcci per il dimensionamento di trincee con abachi.

3 Modellazione 3D di pozzi drenanti

3.1 Introduzione

Il sempre più rapido sviluppo di tecniche HDD (horizontal directional drilling) è destinato a fornire un supporto tecnologico che rende competitivo l'utilizzo dei pozzi drenanti di piccolo e medio diametro. Come già scritto nei capitoli precedenti, questo sistema di drenaggio viene realizzato alternando pozzi con la sola funzione drenante a pozzi accessibili ed ispezionabili, necessari per la realizzazione dello scarico di fondo, che viene eseguito calando una macchina perforatrice all'interno del cavo. Ottimizzando distanze e precisioni, le moderne tecniche di perforazione orizzontale consentono una riduzione considerevole del numero di pozzi ispezionabili o addirittura la loro eliminazione e tale possibilità potrebbe accrescere notevolmente l'interesse pratico verso questo tipo di opera. Nonostante tali prospettive, l'analisi della letteratura sui pozzi drenanti ha messo in luce la carenza di strumenti semplici per il dimensionamento del sistema drenante. Mentre per altre tecnologie, come trincee e dreni sub-orizzontali, esistono diversi metodi di progetto derivanti da analisi numeriche, la letteratura tecnica sui sistemi di pozzi drenanti è povera: le tecniche progettuali attingono ancora a soluzioni analitiche ed in forma chiusa, basate su ipotesi poco realistiche, i cui limiti sono già stati evidenziati nel capitolo precedente.

Le considerazioni sin qui proposte hanno evidenziato la necessità di sviluppare analisi sistematiche per modellare il comportamento di un sistema di pozzi. La complessità del regime idraulico indotto dai pozzi drenanti rende necessario l'utilizzo di un modello tridimensionale. Tale modellazione è argomento di questo capitolo e rappresenta il cuore della presente tesi. In particolare a tale scopo è stato sviluppato un codice di calcolo autonomo (cioè compilato). Nei seguenti paragrafi vengono riportati concetti ed informazioni necessari per la comprensione del codice, partendo dalla descrizione del metodo alle differenze finite utilizzato per la soluzione. Vengono poi descritte le caratteristiche del modello: geometria, condizione iniziale, condizioni al contorno e fase di calibrazione. Viene inoltre dettagliatamente descritto il listato dei comandi per l'implementazione del modello in Matlab. Infine vengono riportati alcuni *output* tipici del programma di calcolo e la validazione del codice.

3.2 Elementi di teoria delle differenze finite

La risoluzione delle equazioni alle derivate parziali (PDE) mediante il metodo numerico delle differenze finite si basa sull'approssimazione discreta delle derivate parziali che compaiono nell'equazione. Tale approssimazione può essere effettuata in ogni punto di un dominio discretizzato, utilizzando opportune combinazioni lineari tra i valori assunti dalla funzione in tale punto e in altri punti ad esso adiacenti.

3.2.1 Approssimazione della derivata prima

Si consideri, ad esempio, il caso di una funzione $f(t)$, continua e differenziabile su un intervallo $[a, b]$, e si divida lo stesso intervallo in sotto-intervalli di ampiezza h . Si possono definire tre punti appartenenti a tale intervallo, rispettivamente t_{i-1} , t_i e t_{i+1} tali che:

$$t_{i-1} = t_i - h; \quad t_{i+1} = t_i + h.$$

Sviluppando in serie di Taylor $f(t_{i-1})$ e $f(t_{i+1})$, prendendo come punto iniziale t_i , e sottraendo la seconda espressione alla prima si può calcolare la derivata prima della funzione come:

$$f'(t_i) = \frac{f(t_{i+1}) - f(t_{i-1}))}{2h} + O(h^2)$$

Il termine $O(h^2)$ è l'errore che si commette, ossia tutto quello che resta nello sviluppo in serie di Taylor, e quindi rappresenta un parametro che definisce il grado di accuratezza nell'approssimare la derivata con l'espressione:

$$f'(t_i) \simeq \frac{f(t_{i+1}) - f(t_{i-1}))}{2h} \quad (3.1)$$

La (3.1) prende il nome di formula alle differenze centrali e, poiché il suo errore dipende da h^2 , viene qualificata come formula del secondo ordine.

Dal punto di vista geometrico questa formula esprime il coefficiente angolare della retta passante per i punti $(t_{i-1}, f(t_{i-1}))$ e $(t_{i+1}, f(t_{i+1}))$ (figura 3.1).

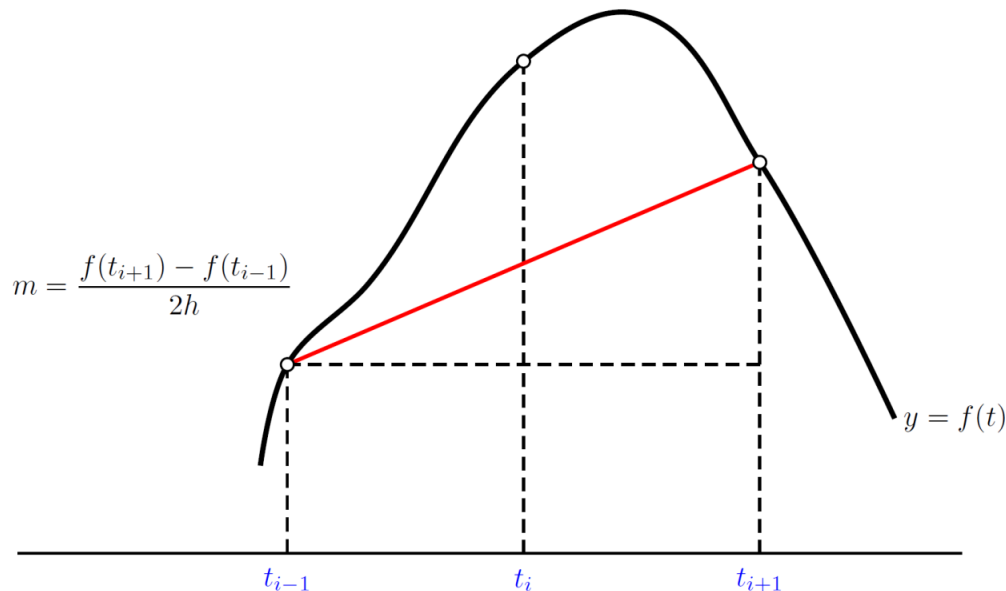


Figura 3.1: significato geometrico della formula alle differenze centrali.

Per l'utilizzo di questa formula per l'approssimazione della derivata prima è necessario conoscere il valore della funzione nel punto di interesse e nei punti adiacenti. Utilizzando diverse combinazioni del valore della funzione in più punti è possibile ottenere

approssimazioni di ordine superiore. Tuttavia, nel caso in cui la funzione presenti delle discontinuità, la derivata prima può essere approssimata facendo riferimento ad uno solo dei punti adiacenti. In questo caso però l'errore risulta $O = O(h)$ ed il grado di approssimazione diventa del primo ordine.

Quando si considera il punto t_{i+1} la derivata prima viene approssimata con la formula alle differenze in avanti (figura 3.2):

$$f'(t_i) \simeq \frac{f(t_{i+1}) - f(t_i)}{h}$$

Quando si considera il punto t_{i-1} la derivata prima viene approssimata con la formula alle differenze all'indietro (figura 3.3):

$$f'(t_i) \simeq \frac{f(t_i) - f(t_{i-1})}{h}$$

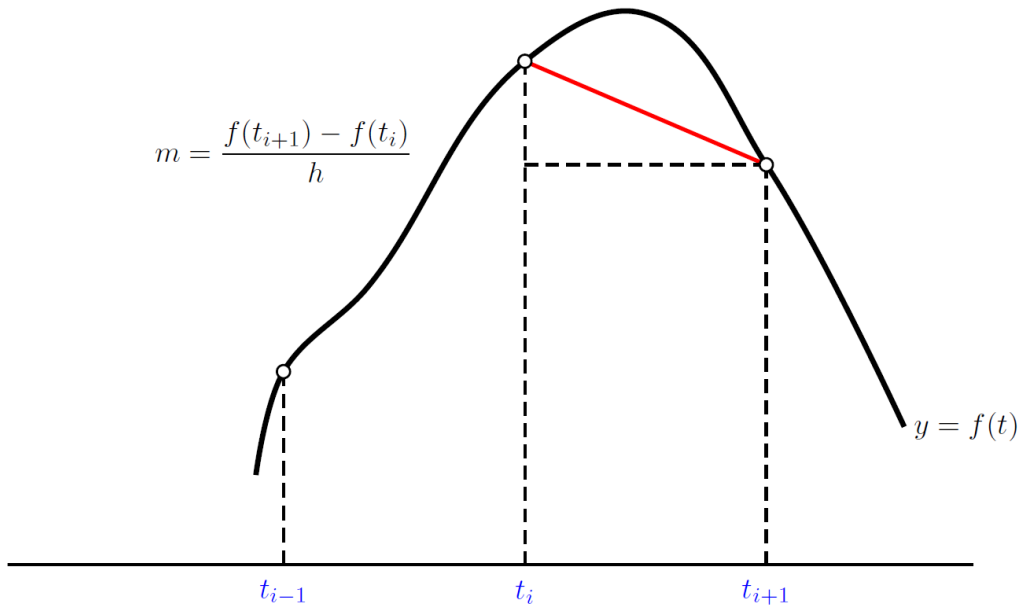


Figura 3.2: significato geometrico della formula alle differenze in avanti.

3.2.2 Approssimazione della derivata seconda

Si consideri ancora il caso della funzione $f(t)$, con riferimento agli stessi punti t_{i-1} , t_i e t_{i+1} è possibile ottenere la derivata seconda sommando i polinomi di Taylor scritti per $f(t_{i-1})$ e $f(t_{i+1})$:

$$f''(t_i) = \frac{f(t_{i+1}) - 2f(t_i) + f(t_{i-1}))}{h^2} + O(h^2)$$

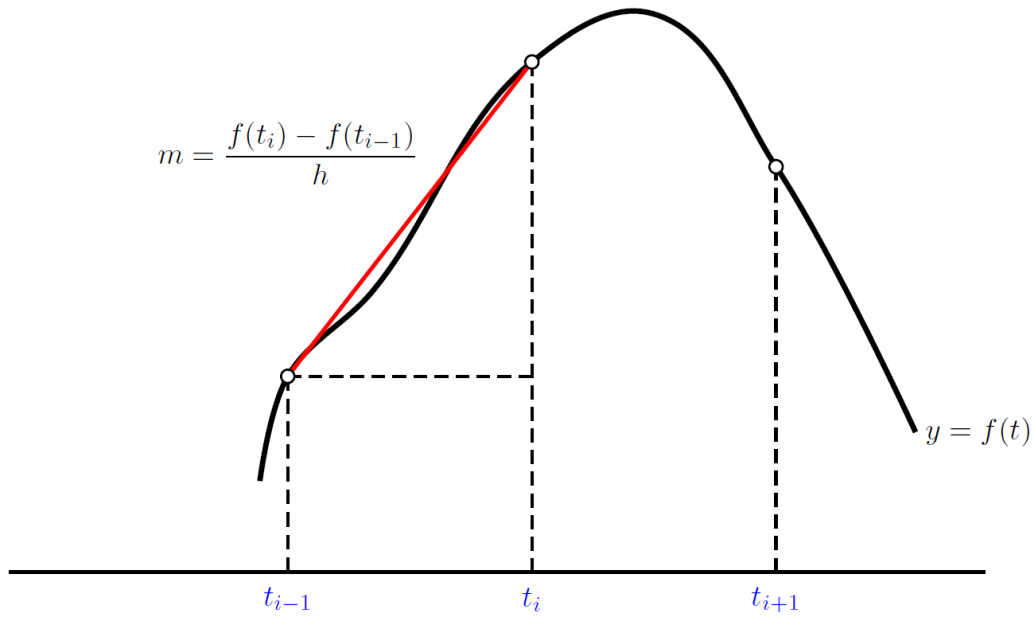


Figura 3.3: significato geometrico della formula alle differenze all'indietro.

E quindi possibile approssimare la derivata seconda con una formula del secondo ordine:

$$f''(t_i) \simeq \frac{f(t_{i+1}) - 2f(t_i) + f(t_{i-1}))}{h^2}$$

L'interpretazione geometrica di tale formula è raffigurata in figura 3.4. Essa rappresenta la derivata seconda della parabola passante per i punti $[t_{i-1}, f(t_{i-1})]$, $[t_i, f(t_i)]$, $[t_{i+1}, f(t_{i+1})]$.

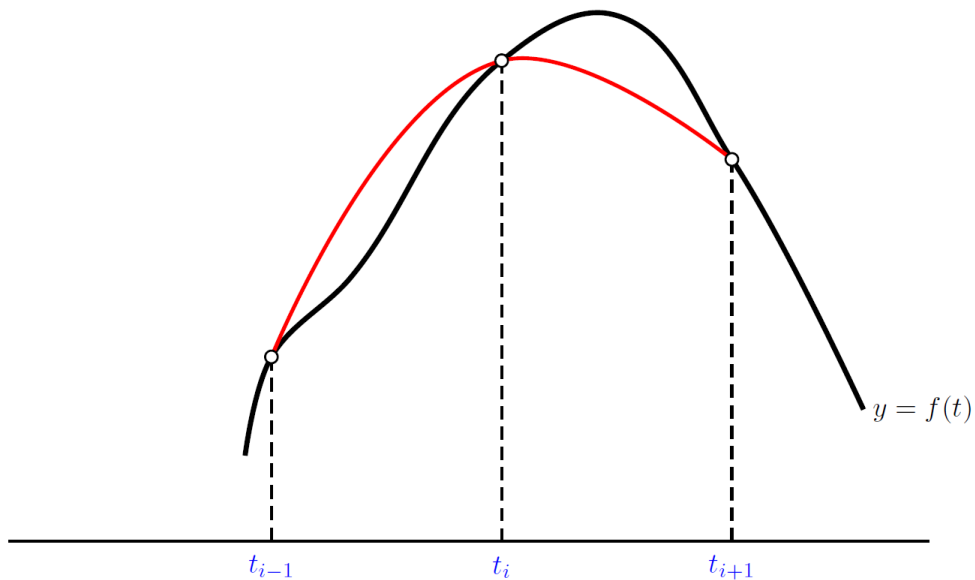


Figura 3.4: significato geometrico dell'approssimazione della derivata seconda.

3.2.3 Approssimazione delle derivate su griglie non uniformi

Quando il dominio viene discretizzato utilizzando una griglia non uniforme, l'approssimazione della derivata prima risulta piuttosto semplice se si ricorda il significato geometrico che essa assume. Infatti supponendo di conoscere i valori $[t_i-h_1, f(t_i-h_1)]$ e $[t_i+h_2, f(t_i+h_2)]$ la derivata prima in t_i può essere approssimata con il coefficiente angolare della retta che passa per tali punti:

$$f'(t_i) \simeq \frac{f(t_i+h_2) - f(t_i-h_1)}{h_1+h_2}$$

Questa formula ha validità generale, si noti infatti come, ponendo $h_1 = h_2$, si ottiene la formula già presentata per griglie uniformi.

L'approssimazione della derivata seconda su griglie non uniformi è leggermente più complessa, ma rappresenta un elemento di fondamentale importanza nello sviluppo del presente lavoro.

Considerata la funzione $f(t_i)$ nel punto di ascissa t_i ed i valori della stessa funzione nei punti adiacenti ma non equidistanti $t_i - h$ e $t_i + sh$, con $0 < s < 1$ e proseguendo in analogia a quanto fatto per il caso di griglie uniformi si ottiene:

$$f''(t_i) = \frac{f(t_i + sh) - 2f(t_i)(1 + s) + sf(t_{i-1})}{sh^2(1 + s)} + O(h)$$

in questo caso però l'errore trascurato è del primo ordine, e pertanto la soluzione risulta meno accurata rispetto al caso di griglia uniforme.

3.2.4 Il metodo di Eulero esplicito

Come già riportato nel paragrafo 2.3, la distribuzione della quota piezometrica all'interno di un pendio è governata dall'equazione di Terzaghi-Rendulic. Si tratta di un'equazione di evoluzione che può essere risolta con il metodo delle differenze finite. Si considera prima la discretizzazione dell'intervallo temporale di osservazione del fenomeno e, successivamente, vengono poste in relazione le approssimazioni in istanti di tempo consecutivi. La conoscenza delle approssimazioni numeriche nei punti al tempo t_n consente di calcolare simultaneamente quelle in t_{n+1} . I metodi possono essere di due tipi:

- Metodi Espliciti: partendo dalla conoscenza delle approssimazioni numeriche in un istante di tempo è possibile calcolare esplicitamente quelle all'istante successivo;
- Metodi Impliciti: lo schema numerico mette simultaneamente in relazione le approssimazioni in due (o più) istanti di tempo consecutivi e, per calcolare l'approssimazione nell'istante di tempo successivo, è necessario risolvere un sistema lineare.

Il metodo scelto per la risoluzione dell'equazione di Terzaghi-Rendulic è il Metodo di Eulero Esplicito (MEE).

Per semplicità viene illustrato prima il metodo applicato al caso di consolidazione monodimensionale $h=h(x,t)$. In seguito i risultati ottenuti vengono estrapolati al caso tridimensionale.

Si consideri l'equazione parabolica della consolidazione:

$$c_v \cdot h_{xx}(x, t) = h_t(x, t), \quad 0 \leq x \leq L, \quad t \geq 0 \quad (3.2)$$

con condizione iniziale:

$$h(x, 0) = f(x), \quad 0 \leq x \leq L, \quad (3.3)$$

e condizioni al contorno:

$$h(0, t) = g_1(t), \quad h(L, t) = g_2(t), \quad t \geq 0 \quad (3.4)$$

Poiché per $t \geq 0$ non è ovviamente possibile calcolare la soluzione all'infinito, si sostituisce a $t \geq 0$ $t \in [0, T_{max}]$. La costante T_{max} è generalmente determinata dalla fisica del fenomeno osservato. L'equazione viene integrata numericamente negli istanti di tempo $t_n \leq T_{max}$. La risoluzione numerica di questa equazione richiede la sua discretizzazione sia rispetto al tempo sia rispetto allo spazio. Il problema discreto è ottenuto mediante l'approssimazione delle derivate parziali attraverso differenze finite. Si sceglie un intero positivo N_x e si definisce la striscia:

$$d\{(x, t) : x \in [0, L], t \geq 0\}$$

una griglia rettangolare formata dai punti di coordinate (x_j, t_n) tale che:

$$x_j = j\Delta x, j = 0, 1, \dots, N_x + 1, t_n = n\Delta t, n \geq 0,$$

con:

$$\Delta x = \frac{L}{(N_x + 1)}, \quad \Delta t = \frac{T_{max}}{N_t}.$$

Il valore Δt rappresenta l'intervallo di tempo tra due approssimazioni successive. I punti (x_j, t_n) del dominio discreto sono di tre tipi, evidenziati in figura 3.5.

L'approssimazione di $h(x_j, t_n)$ è denotata con h_j^n . Utilizzando l'operatore differenza centrale si può approssimare la derivata parziale seconda nel modo già visto in precedenza:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}(x_j, t_n) \simeq \frac{h_{j+1}^n - 2h_j^n + h_{j-1}^n}{(\Delta x)^2}$$

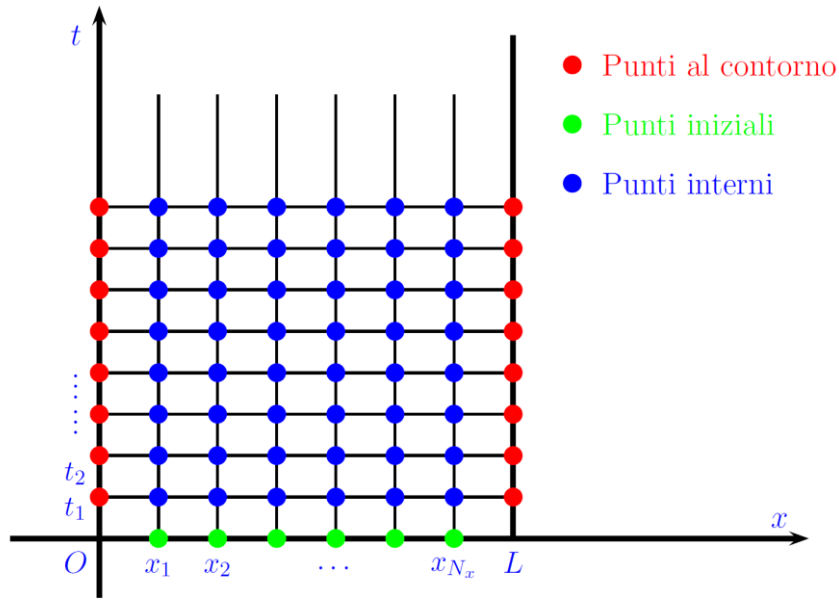


Figura 3.5: schema di calcolo del Metodo di Eulero Esplicito 1D.

Mentre utilizzando l'operatore differenza in avanti per la derivata temporale, si ottiene:

$$\frac{\partial h}{\partial t}(x_j, t_n) \simeq \frac{h_j^{n+1} - h_j^n}{\Delta t}.$$

Sostituendo nella (3.2) si ha:

$$c_v \frac{h_{j+1}^n - 2h_j^n + h_{j-1}^n}{(\Delta x)^2} = \frac{h_j^{n+1} - h_j^n}{\Delta t}.$$

$$h_j^{n+1} = h_j^n + \frac{c_v \Delta t}{(\Delta x)^2} (h_{j+1}^n - 2h_j^n + h_{j-1}^n)$$

E infine si ha come risultato il Metodo di Eulero Esplicito:

$$h_j^{n+1} = r h_{j-1}^n + (1 - 2r) h_j^n + r h_{j+1}^n \quad (3.5)$$

dove:

$$r = \frac{c_v \Delta t}{(\Delta x)^2}$$

è una costante che prende il nome di Numero di Courant. Partendo da $n=0$ la formula (3.5) consente di determinare esplicitamente le approssimazioni $h_j^1, j = 1, \dots, N_x$; pertanto si tratta di un metodo esplicito. In modo analogo, conoscendo le approssimazioni al livello n , essa consente di calcolare quelle a livello $n+1$. La condizione iniziale (3.3) fornisce i valori:

$$h_j^0 = f(j\Delta x), \quad j = 0, 1, 2, \dots, N_x + 1.$$

Quando $j=1$ e $j=N_x$ la formula (3.5) utilizza le condizioni sulla frontiera (3.4):

$$h_0^n = g_1(t_n), \quad h_{N_x}^n = g_2(t_n).$$

Affinché la soluzione approssimata ottenuta con il MEE possa essere considerata valida, è necessario garantire la convergenza dello schema numerico. Essa rappresenta la proprietà che ha la soluzione numerica di convergere alla soluzione reale, quando il passo di discretizzazione tende a zero. Un metodo numerico è convergente quando risulta consistente e stabile.

La consistenza di uno schema numerico è verificata se, al tendere a zero dei passi di discretizzazione Δx e Δt , l'errore locale unitario di troncamento τ_j^n , tende a zero. Il MEE, in virtù delle approssimazioni usate, è sempre consistente in quanto risulta:

$$\tau_j^n = O[(\Delta x^2)] + O(\Delta t)$$

La stabilità di un algoritmo è la sua capacità di evitare la propagazione di errori commessi durante il calcolo. Un tipico esempio di errore è quello, inevitabile, di arrotondamento. A differenza della consistenza, che per il MEE risulta sempre garantita, la condizione di stabilità impone delle restrizioni sulla discretizzazione del dominio spazio-tempo, tali da soddisfare la disequazione:

$$r = \frac{c_v \Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2}$$

I risultati sin qui illustrati per il caso monodimensionale possono essere facilmente estrapolati ed applicati al caso della consolidazione in regime tridimensionale. Infatti, aggiungendo le altre due variabili spaziali, l'equazione da risolvere diventa:

$$c_v([h_{xx}(x, y, z, t) + h_{yy}(x, y, z, t) + h_{zz}(x, y, z, t)]) = h_t(x, y, z, t)$$

con:

$$0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq y \leq L_y, \quad 0 \leq z \leq L_z, \quad t \geq 0$$

Il dominio può essere discretizzato definendo:

$$\begin{aligned} x_i &= i\Delta x, & i &= 0, 1, \dots, N_x + 1 \\ y_j &= j\Delta y, & j &= 0, 1, \dots, N_y + 1 \\ z_k &= k\Delta z, & k &= 0, 1, \dots, N_z + 1 \\ t_n &= n\Delta t, & n &\geq 0 \end{aligned}$$

In ogni punto del dominio discretizzato al passo temporale n può definirsi la soluzione approssimata:

$$h_{i,j,k}^n \simeq h(x_i, y_j, z_k)$$

Infatti, sostituendo l'operatore differenza centrale alle derivate seconde spaziali, e l'operatore differenza in avanti alla derivata prima nel tempo, si ottiene:

$$c_v \left[\frac{h_{i+1,j,k}^n - 2h_{i,j,k}^n + h_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{h_{i,j+1,k}^n - 2h_{i,j,k}^n + h_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{h_{i,j,k+1}^n - 2h_{i,j,k}^n + h_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right] - \frac{h_{i,j,k}^{n+1} - h_{i,j,k}^n}{\Delta t} = 0 \quad (3.6)$$

Dalla (3.6) è possibile calcolare, in ogni punto, la quota piezometrica h al passo di tempo $n+1$, a partire dalla distribuzione di h nello stesso punto e nei punti adiacenti al passo n (figura 3.6).

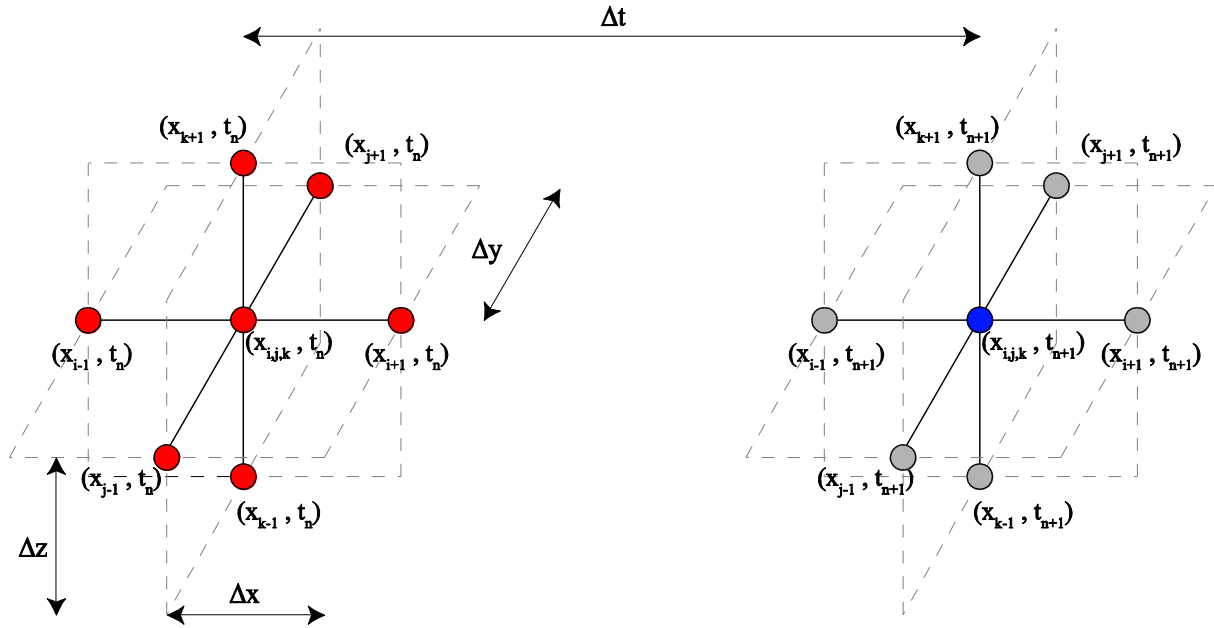


Figura 3.6: schema di calcolo del Metodo di Eulero Esplicito 3D.

Allo stesso modo del caso monodimensionale, per garantire la convergenza della approssimazione calcolata, deve essere soddisfatta la condizione di stabilità.

$$\Delta t \cdot c_v \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2} \right) \leq 0.5 \quad (3.7)$$

Proprio la condizione necessaria per garantire la stabilità dello schema numerico, rappresenta il limite più grande del Metodo di Eulero Esplicito. Essa grava in maniera duplice sull'onere di calcolo quando si cerca una buona approssimazione della soluzione.

Per capire tale limite bisogna tenere presente che la durata delle operazioni di calcolo dipende dalla quantità di dati elaborati ad ogni singolo passo (cioè dalla discretizzazione spaziale) e dal numero di elaborazioni necessarie per coprire l'intervallo temporale scelto (cioè dalla discretizzazione temporale).

La condizione di stabilità, vincola la scelta del passo temporale alla dimensione degli intervalli spaziali. Ciò significa che ad una griglia spaziale più fitta, che garantisce una soluzione più precisa, corrisponde una griglia temporale parimenti più fitta. In questo modo la

durata del calcolo viene incrementata sia dall'onere della numerosità dei punti spaziali che dall'incremento del numero di passi temporali da analizzare.

Tale limite è ancora più enfatizzato dal fatto che la discretizzazione spaziale compare in forma quadratica nell'equazione di stabilità. Dimezzare la dimensione degli elementi della mesh impone di quadruplicare il numero di passi temporali necessari.

Nel caso tridimensionale, l'onere computazionale viene ulteriormente aggravato osservando che la condizione di stabilità è ben più restrittiva di quella vista per il caso monodimensionale; infatti, supponendo di utilizzare lo stesso passo di discretizzazione per x , y e z ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$), la condizione di stabilità diventa:

$$\frac{c_v \Delta t}{\Delta^2} \leq \frac{1}{6}$$

Ciò vuol dire che a parità di discretizzazione (passo spaziale), rispetto al caso monodimensionale non solo si triplica la quantità dei dati spaziali (in quanto bisogna tener conto di una mesh tridimensionale) ma anche il numero di passi temporali di calcolo.

Nonostante i limiti appena illustrati, il Metodo di Eulero Esplicito è stato scelto per eseguire le analisi numeriche. Le ragioni di tale scelta risiedono nella relativa semplicità di programmazione di questo metodo rispetto ad altri. Osservando l'equazione (3.6) si può notare che essa presenta la sola incognita $h_{i,j,k}^{n+1}$. Questa può essere calcolata contemporaneamente in ogni punto del dominio con un'unica operazione di calcolo, come combinazione lineare di matrici tridimensionali. Ciascun elemento di queste matrici corrisponde ad un punto del dominio, realizzando così una corrispondenza biunivoca estremamente intuitiva dal punto di vista fisico.

Altri metodi, qui non riportati, hanno il grosso vantaggio di essere incondizionatamente stabili, permettendo la scelta dell'intervallo di tempo indipendentemente dalla discretizzazione spaziale e garantendo notevole risparmio sui tempi di calcolo. Tuttavia le equazioni di questi metodi presentano sempre più di una incognita. Ciò comporta la necessità di dover risolvere ad ogni istante di tempo un sistema di equazioni e richiede una numerazione ad hoc delle incognite che introduce non poche difficoltà in fase di programmazione. Inoltre questi metodi risultano meno intuitivi dal punto di vista fisico.

Nel seguito, quando verrà descritta l'implementazione in Matlab del modello, questi concetti saranno illustrati più chiaramente.

3.3 Schema geometrico

Lo schema geometrico studiato è illustrato in figura 3.7. Si considera una porzione di pendio indefinito inclinato di un angolo " α ", ipotizzando l'esistenza di un substrato impermeabile ad una profondità dal piano campagna pari ad " H ". Tale pendio viene drenato da pozzi drenanti di diametro " d " disposti in file parallele alla linea di massima pendenza del pendio. Lungo ogni fila di pozzi, anch'essa considerata indefinita, gli elementi drenanti sono distanziati

dell'interasse " i " e raggiungono la profondità " H_0 ". Si suppone inoltre indefinito anche il numero delle file e che esse siano tutte parallele e distanziate da un interasse " s ".

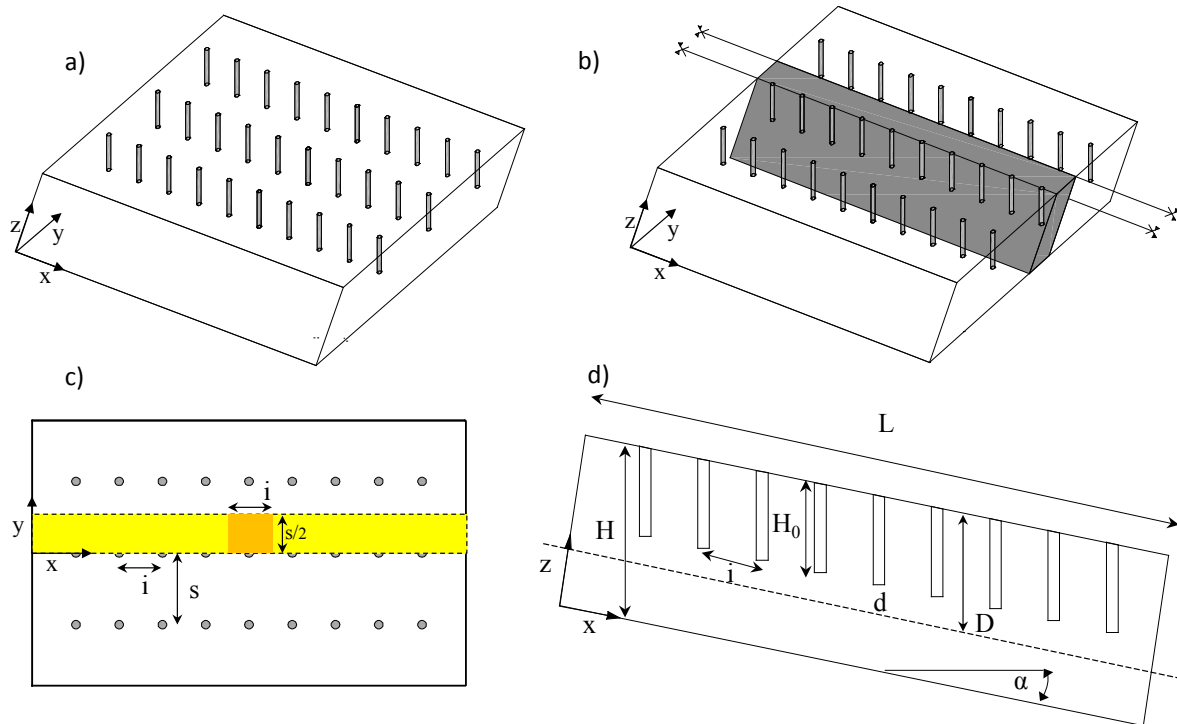


Figura 3.7: Sistema reticolare di pozzi: a) Geometria 3D. b) Dominio di riferimento. c) Pianta. d) Sezione longitudinale.

In altre parole un pendio indefinito viene drenato da una serie di pozzi disposti secondo maglie rettangolari di dimensioni " i " ed " s " rispettivamente nella direzione di massima pendenza e nella direzione trasversale (figura 3.7c).

Tale configurazione permette da un lato di considerare geometrie generali, dall'altro di individuare una serie di piani di simmetria che riducono il dominio da analizzare (figura 3.7b). Tale riduzione è di fondamentale importanza per contenere la quantità di dati coinvolti nel processo di calcolo, riducendo così anche il tempo necessario per la risoluzione del problema.

L'efficienza viene valutata sull'area di influenza del pozzo posto al centro rispetto alla dimensione longitudinale del pendio. Tale area di influenza (evidenziata in arancione in figura 3.7c) appartiene a superfici parallele al piano campagna poste ad una profondità " D ".

3.4 Calibrazione delle dimensioni del dominio

Per ridurre il più possibile l'onere computazionale, imposto dal soddisfacimento della condizione di stabilità, bisogna ridurre al minimo il numero di punti in cui viene discretizzato il dominio. Tale operazione è possibile sfruttando le già accennate condizioni di simmetria.

Infatti assumendo un numero infinito di file di pozzi drenanti, il piano passante per la mezzeria dei dreni e quello per l'interasse tra di essi possono essere considerati di simmetria.

Questi due piani definiscono le superfici laterali del dominio. Le superfici di monte e di valle e quindi la lunghezza del dominio " L " sono state scelte sulla base di alcune analisi di calibrazione (tabella 3.1), confrontando le efficienze ottenute con differenti valori di L , al fine di determinare il minimo valore di questa dimensione che non influenza la soluzione nella zona centrale del dominio analizzato.

# Analisi	L	H_0	H	i=s	d	cv	\bar{E}_∞			L/H
							D=15m	D=10m	D=5m	
-	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ² /s]	[%]	[%]	[%]	[-]
1	80	10	25	22,5	0,6	1,00E-06	8,707007	13,56502	17,65401	3,2
2	100	10	25	22,5	0,6	1,00E-06	9,589007	14,55402	18,69001	<u>4</u>
3	150	10	25	22,5	0,6	1,00E-06	9,783007	14,68052	18,76401	6
4	200	10	25	22,5	0,6	1,00E-06	9,969007	14,88052	18,98001	8
5	250	10	25	22,5	0,6	1,00E-06	9,980007	14,90502	19,00401	10

Tabella 3.1: analisi per la calibrazione della lunghezza L del dominio.

Sulla base dei risultati ottenuti si è deciso di considerare un rapporto tra la lunghezza e l'altezza del dominio non inferiore a 4. Lo stesso risultato era stato già ottenuto da Stanic (1984) per l'analisi tridimensionale di trincee indefinite, disposte nella direzione di massima pendenza di un pendio indefinito.

3.5 Calibrazione della mesh

Si è già affermato che il metodo usato è "consistente"; ciò significa che l'errore di approssimazione che viene commesso tende a zero quando tende a zero la distanza tra i punti in cui viene discretizzato il dominio. Una mesh molto fitta garantisce un margine di errore molto ridotto ma al contempo genera altri problemi, rendendo il calcolo estremamente oneroso. Infatti, incrementando il numero di punti in cui viene discretizzato il dominio aumenta considerevolmente la quantità di dati da elaborare e da salvare ad ogni passo di tempo. Ma il problema più importante è che una mesh più fitta richiede un passo temporale più piccolo per il soddisfacimento della condizione di stabilità. Tutto ciò si traduce in una notevole quantità sia di memoria che di potenza di calcolo pura richiesta al calcolatore ed in tempi di attesa molto lunghi.

Una serie di analisi di calibrazione, i cui risultati sono riportati in tabella 3.2, ha evidenziato come per dimensioni della mesh sempre più piccole la soluzione in termini di efficienza tende ad un valore ben individuato, a cui si stabilizza. In particolare i risultati hanno condotto ad adottare una discretizzazione dell'ordine di 0,1 volte il diametro del pozzo per Δx , Δy , e di

0,25 per Δz . Questo risultato è condizionato dalla necessità di definire con sufficiente precisione la sezione drenante, quindi è regolato da una parte molto ridotta del dominio analizzato.

# Analisi	L	H ₀	H	i	d	cv	$\bar{E}_\infty(D=15m)$	Δz	$\Delta x, \Delta y$
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ² /s]	[-]	[m]	[m]
1	120	15	15	5	1	1,00E-06	58,52	0,25	0,2
2	120	15	15	5	1	1,00E-06	59,45	0,25	0,1
3	120	15	15	5	1	1,00E-06	60,09	0,25	0,066
4	120	15	15	5	1	1,00E-06	60,00	0,25	0,05

Tabella 3.2: analisi per la calibrazione della mesh.

La discretizzazione scelta, basata sui risultati delle analisi appena illustrate, è in grado di garantire una buona precisione della soluzione, ma risulta ancora troppo onerosa per il calcolo, al punto che in alcuni casi è stato impossibile portare a termine le analisi per insufficienza di memoria del pc. Un primo tentativo di risolvere questo problema è consistito nella scrittura di alcune righe di comando che permettono di salvare la matrice tridimensionale delle quote h solo per alcuni passi preventivamente scelti. Nonostante gli sforzi profusi in tal senso, la procedura di calcolo doveva essere ulteriormente alleggerita.

L'operazione che ha permesso una notevole riduzione della quantità di dati coinvolti nel calcolo, senza rinunciare alla qualità dell'approssimazione, è stata la divisione del dominio in 6 parti; ciascuna di esse caratterizzata da elementi della mesh con differenti dimensioni Δx e Δy , lasciando invece invariata la dimensione Δz . Ciò in ragione delle necessità locali richieste dal calcolo, a cui si è accennato in precedenza.

In particolare il dominio è stato diviso in 6 regioni. Ciascuna di esse è un parallelepipedo la cui sezione nel piano x - y è rappresentata da uno dei 6 rettangoli raffigurati in una figura 3.8.

La regione rappresentata in sezione dal rettangolo rosso BCGF è quella a cui è stata assegnata la mesh più fitta, con il passo derivato dalle analisi di calibrazione: $\Delta x = \Delta y = 0,1d$.

Alle regioni rappresentate in sezione dai rettangoli azzurri ABFE e CDHG è stata assegnata la discretizzazione $\Delta x = 0,4d$ e $\Delta y = 0,1d$.

Alle regioni rappresentate in sezione dai rettangoli verdi EFLI e GHNM è stata assegnata la discretizzazione $\Delta x = 0,4d$ e $\Delta y = 0,4d$.

Alla regione rappresentata in sezione dal rettangolo giallo FGML è stata assegnata la discretizzazione $\Delta x = 0,1d$ e $\Delta y = 0,4d$.

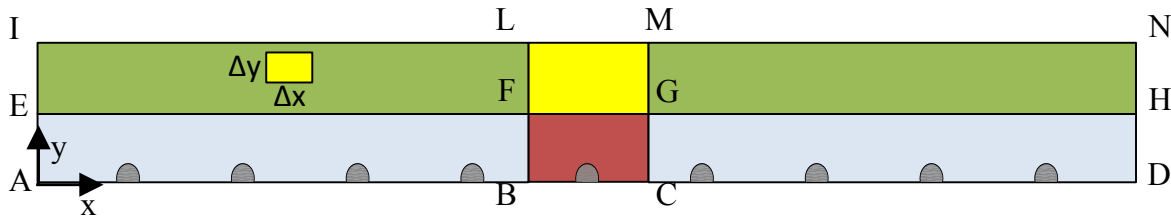


Figura 3.8: regioni del dominio a differente discretizzazione utilizzate per il calcolo: sezione nel piano x-y.

La discretizzazione appena illustrata richiede l'implementazione nel codice di calcolo della formula alle differenze finite su griglie non uniformi. Ciò comporta, in sede di calcolo, il passaggio da una sola equazione in forma matriciale, valida per l'intero dominio, a 15 equazioni.

Per i punti interni alle regioni vengono scritte sei equazioni in forma matriciale del tipo 3.6.

Per i piani di interfaccia tra le regioni rappresentate in sezione dai segmenti EF, FG, GH, BF, FL, CG, GM l'equazione risolvibile prevede l'utilizzo della formula alle differenze centrali per una delle 2 variabili spaziali x o y .

Per i segmenti di interfaccia tra 4 regioni, in sezione rappresentati dai punti F e G, l'equazione risolvibile prevede l'utilizzo della formula alle differenze centrali sia per le derivate seconde in x che per quelle in y .

3.6 Condizione iniziale

La condizione iniziale considerata nel calcolo è rappresentata da falda idrica in condizioni di moto uniforme con superficie libera coincidente con il piano campagna. Il moto è diretto da monte verso valle parallelamente alle linee di massima pendenza (figura 3.9a). In queste condizioni ogni piano normale al piano campagna rappresenta una superficie isopiezica (figura 3.9b) e la condizione iniziale può essere espressa dall'eq.(3.8).

$$h_0(t=0) = (L-x) \cdot \sin(\alpha) + H \cdot \cos^2(\alpha) \quad (3.8)$$

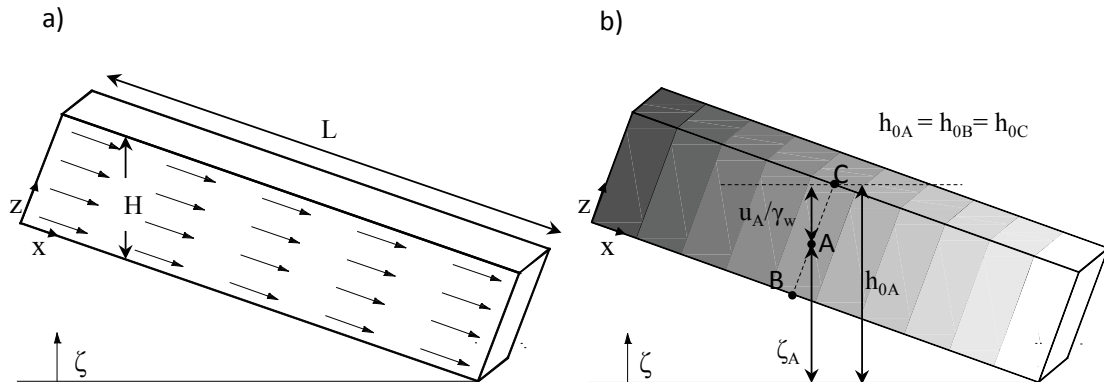


Figura 3.9: condizioni iniziali $h=h_0$: a) vettori filtrazione paralleli al piano campagna; b) contorni di quota piezometrica.

3.7 Condizioni al contorno

Il codice numerico, basato sul Metodo di Eulero Esplicito, calcola la quota piezometrica solo per i punti interni al dominio. Sui bordi del dominio e nel volume dei dreni devono essere assegnate condizioni che rispecchino la situazione reale, dalle quali dipende la condizione stazionaria al termine della fase transitoria. In questo paragrafo vengono riportate le condizioni di tipo analitico applicate al contorno e una breve spiegazione del significato fisico che esse rappresentano:

- $\partial h / \partial y = 0$ per $y=0$, $y=s/2$: queste superfici sono piani di simmetria e si comportano come superfici impermeabili in quanto non può esserci flusso che li attraversi, essendo la quota piezometrica uguale da entrambi i lati (figura 3.10 a e 3.10b);
- $\partial h / \partial z = 0$ per $z=0$: alla base del dominio viene ipotizzata la presenza di una formazione rocciosa impermeabile (figura 3.10c);
- $h=h_0$ per $x=0$, $x=L$: sulle superfici di monte e di valle è assegnata una condizione di carico indisturbata; per effetto della lunghezza del dominio, scelta durante la fase di calibrazione, questa condizione non influenza la soluzione nella zona centrale del pendio, dove viene calcolata l'efficienza ed è pertanto automaticamente assegnata dal codice (figura 3.10d);
- $h=\zeta$ per $z=H \cdot \cos(\alpha)$ e sui dreni: ossia sul piano campagna e sui dreni è assegnato un carico pari alla quota geodetica, corrispondente a pressione neutra nulla (figura 3.10c).

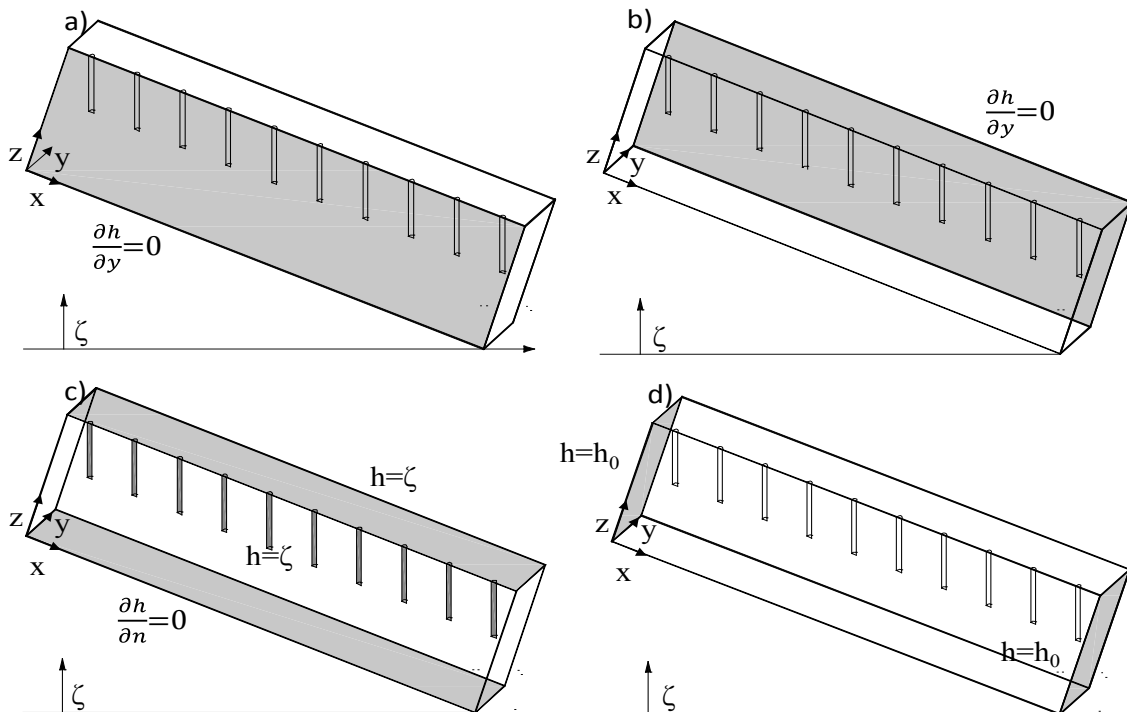


Figura 3.10: condizioni al contorno: a) piano passante per i pozzi; b) piano di simmetria interfila; c) piano campagna, superficie dei pozzi, substrato inferiore; d) superfici di monte e di valle.

3.8 Implementazione in Matlab

In questo paragrafo viene riportato e commentato, per parti, il listato dei comandi eseguito da Matlab per la fase di elaborazione: ciò è la base del codice che si illustrerà. Alcuni simboli usati nel codice sono diversi da quelli sin qui usati per la trattazione del problema. Per chiarezza di esposizione, nei commenti al listato, vengono indicati tra parentesi i riferimenti alla geometria già descritta in precedenza ed ai relativi simboli. Per semplicità tale geometria viene qui riproposta (figura 3.11) insieme allo schema di discretizzazione nel piano x - y .

3.8.1 Input del modello

Le prime righe di comando riguardano la definizione dei parametri di input (figura 3.12). Alcuni di essi, come ad esempio le variabili di ingresso “step1anno” e “step2anno”, sono

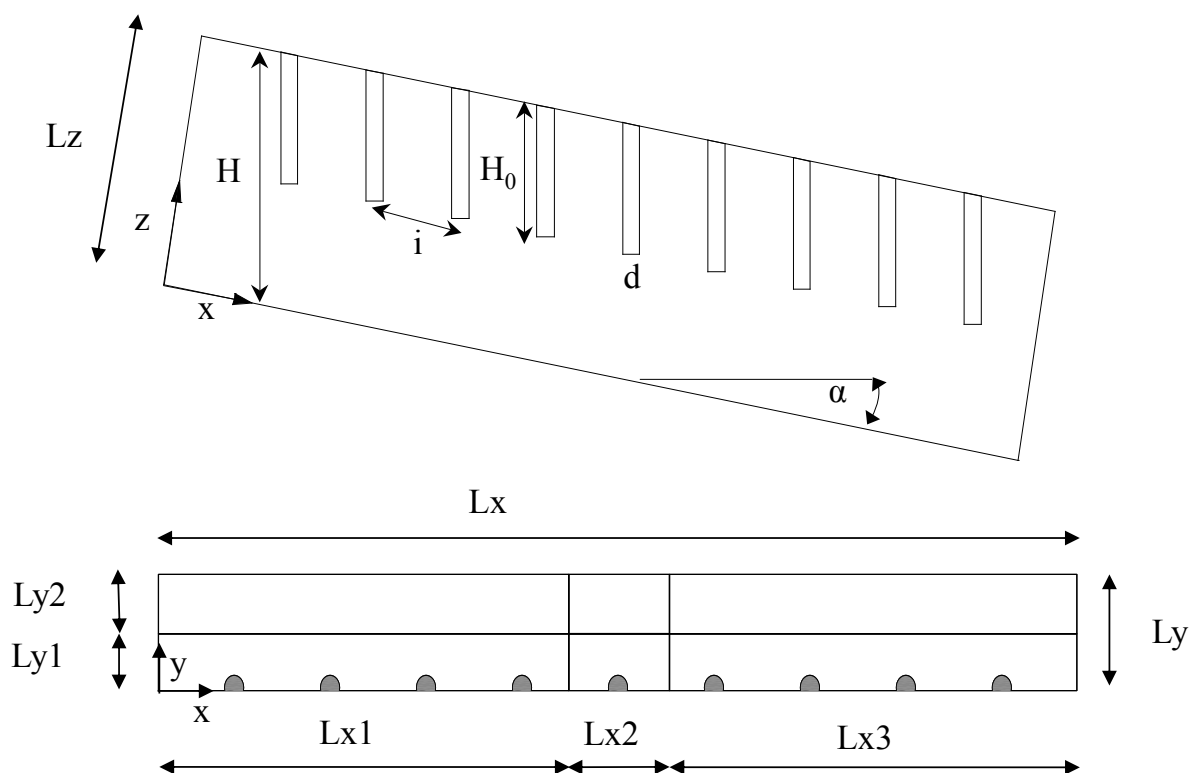


Figura 3.11: schemi di riferimento per il listato dei comandi.

introdotti per permettere il salvataggio dei dati. Essi permettono di scegliere quante volte salvare i dati, rispettivamente, durante il primo anno e durante gli anni successivi, in modo da controllare l'intervallo temporale tra due salvataggi successivi.

Il valore di “step1anno” deve essere di norma il maggiore dei due in quanto, durante la prima fase, il processo di riduzione delle pressioni neutre è molto rapido. In seguito il numero di salvataggi può ridursi considerevolmente. Valori troppo elevati di questi due parametri possono portare ad un blocco del software per insufficienza di memoria.

```

%Parametri input
a=10; D=1.2; intlong=10; hpalo=10; cv=10^-6; anni=35;
step1anno=8; step2anno=2; profonditaEFF=hpalo; intrasv=10;
psi=15; mx2=0.10; mx1=0.40; mx3=0.40; mz=0.25; my2=0.4; my1=0.1;
%a=inclinazione pendio; D=diámetro pozzo; intlong=interasse tra pozzi (i)
%hpalo= profondità raggiunta dai pozzi; intrasv=interasse tra le file (s)
%cv=coefficiente di consolidazione; anni=durata dell'analisi in anni;
%step1anno=numero di salvataggi durante il primo anno
%step2anno=numero di salvataggi durante gli anni successivi al primo
%profonditaEFF=profondità sulla quale vengono raffigurate le pressioni ad
%ogni step per il controllo dei risultati
%psi=profondità del substrato impermeabile
%mx1,mx2,mx3= massimi valori per la discretizzazione del vettore x
%my1,my2=massimi valori per la discretizzazione del vettore y
%mxz=massimo valore per la discretizzazione del vettore z

```

Figura 3.12: fase di inserimento dei parametri di input.

3.8.2 Discretizzazione del dominio

Una volta definiti i parametri, si passa alla costruzione del dominio e alla discretizzazione dei vettori (figura 3.13).

```

Lx=100;
Lx1=Lx/2-3/4*intlong ; Lx3=Lx1; Lx2=Lx-Lx1-Lx3
nx2=round(Lx2/mx2);
if mod(nx2,2)==1;
nx2=nx2+1;
end

nx1=round(Lx1/mx1);
if mod(nx1,2)==1;
nx1=nx1+1;
end

nx3=round(Lx3/mx3);
if mod(nx3,2)==1;
nx3=nx3+1;
end
nx=nx1+nx2+nx3;
%nx=numero di elementi del vettore Lx
%nx1=numero di elementi del vettore Lx1
%nx2=numero di elementi del vettore Lx2
%nx3=numero di elementi del vettore Lx3

Lz=psi*cosd(a); nz=round(psi/mz);
Ly=intrasv/2; Ly1=2; ny1=20;
Ly2=Ly-Ly1; ny2=ceil(Ly2/my2); ny=ny1+ny2;
%ny=numero di elementi del vettore Ly
%ny1=numero di elementi del vettore Ly1
%ny2=numero di elementi del vettore Ly2

n=floor(Lx/intlong);
%n=numero di pozzi in direzione longitudinale

```

Figura 3.13: definizione dei vettori geometrici e delle relative discretizzazioni.

Ai vettori $Lx2$ e $Ly1$ compete la discretizzazione più fitta. Essi individuano un'area che comprende la sezione drenante. Infatti la discretizzazione di quest'ultima influenza sensibilmente la convergenza della soluzione approssimata a quella reale.

3.8.3 Adimensionalizzazione

L'adimensionalizzazione delle grandezze geometriche e del fattore di tempo T , viene effettuata rispetto alla profondità (lungo la verticale) raggiunta dal pozzo H_0 (figura 3.14).

```
%adimensionalizzazione
LX=Lx/hpalo ; LX1=Lx1/hpalo ; LX2=Lx2/hpalo ; LX3=Lx3/hpalo ;
LZ=Lz/hpalo ; LY=Ly/hpalo ; LY1=Ly1/hpalo ; LY2=Ly2/hpalo ;
T=cv*t/(hpalo^2) ; cv=1; Hpalo=hpalo/hpalo ; D=D/hpalo; intlongadim=intlong/hpalo;
```

Figura 3.14: adimensionalizzazione dei parametri.

Il coefficiente c_v , una volta utilizzato per ottenere il fattore di tempo T , viene impostato automaticamente al valore $c_v=1$. Ciò avviene perché le equazioni risolutive sono scritte originariamente in forma dimensionale e prevedono la definizione di un valore di c_v .

3.8.4 Verifica della condizione di stabilità

Per la discretizzazione della variabile temporale si deve tenere conto della condizione di stabilità espressa dalla formula (3.7). A tal proposito vengono per prima calcolate le effettive dimensioni degli elementi della mesh. Infatti, i valori definiti in fase di input sono solo indicativi: essi rappresentano il massimo valore che le dimensioni dell'elemento può raggiungere. I valori effettivi vengono calcolati in maniera da garantire l'equidistanza dei punti in cui viene discretizzato ogni singolo vettore.

Il numero di discretizzazioni del dominio del tempo viene calcolato per tentativi utilizzando un *ciclo while*. Il valore di nt viene incrementato fino al soddisfacimento dell'equazione di stabilità. Si noti in figura 3.15 che la stabilità viene garantita solo per la regione in cui è stata resa più fitta la mesh ($dx2$, $dy2$, dz).

```
%Verifica di stabilità
st=.5;
dx2=LX2/nx2; dz=LZ/nz; dy1=LY1/ny1; dy2=LY2/ny2; dx1=LX1/nx1; dx3=LX3/nx3;
while T/nt*(1/dx2^2+1/dz^2+1/dy1^2)>st
    nt=nt+1;
end
dt=T/nt ;
%controllo
if dy2<dy1 || dx3<dx2 || dx1<dx2
    error( 'dy2 have to be > than dy1, dx1 and dx3 have to be > than dx2')
end
```

Figura 3.15: calcolo della dimensione dell'intervallo temporale e verifica della condizione di stabilità.

Il valore dt così calcolato soddisfa automaticamente la condizione di stabilità nelle altre regioni in cui viene diviso il dominio. A tal proposito nel codice è implementato una stringa di controllo che blocca il calcolo e genera una finestra di errore se le dimensioni degli elementi della mesh delle altre regioni dovessero risultare più piccole di quelle utilizzate nella verifica della condizione di stabilità.

3.8.5 Inizializzazione

Durante la fase di inizializzazione il codice genera i termini necessari per il ciclo di calcolo FDM e per la fase di post-processing. Vengono definiti, per prima, i numeri di Courant utilizzati per ottenere la soluzione nei punti interni alle sei zone di discretizzazione in modo da evitare di ripetere tale calcolo ad ogni passo. In seguito vengono definiti i vettori coordinate delle singole zone e quelli globali. Viene inoltre pre-allocato lo spazio-memoria per la matrice della soluzione e delle quote geometriche. Quest'ultima viene poi determinata attraverso un doppio *ciclo for*. Quanto ai termini RX ed RY , riportati in figura 3.16, essi sono i semi-assi dell'ellisse rappresentata dall'intersezione del singolo pozzo con il generico piano x - y (corrispondente al piano di coordinate $z(k)$). Infatti poiché l'asse del pozzo è verticale e, per il riferimento considerato, non ortogonale al piano x - y , risulta che l'intersezione di tale piano con la superficie cilindrica del pozzo genera un ellisse.

```
%Inizializzazione
rxx1=cv*dt/dx1^2; rxx2=cv*dt/dx2^2; rxx3=cv*dt/dx3^2; ryy1=cv*dt/dy1^2;
ryy2=cv*dt/dy2^2; rz=cv*dt/dz^2; rxly1=rxx1+ryy1+rz; rxly2=rxx1+ryy2+rz;
rx2y1=rxx2+ryy1+rz; rx2y2=rxx2+ryy2+rz; rx3y1=rxx3+ryy1+rz; rx3y2=rxx3+ryy2+rz;
%numneri di courant per le zone a differente densità di discretizzazione
l=dy1/dy2; s1=dx2/dx1; s2=dx2/dx3;
%rapporti tra le mesh per la formula FDM su griglie non uniformi
x1=linspace(0,LX1-dx1,nx1); x2=linspace(LX1,LX1+LX2-dx2,nx2);
x3=linspace(LX1+LX2,LX,nx3+1); x=[x1 x2 x3];
y1=linspace(0,LY1-dy1,ny1); y2=linspace(LY1,LY,ny2+1); y=[y1 y2];
z=linspace(0,LZ,nz+1); t=linspace(0,T,nt+1);
%vettori coordinate spaziali e temporali
npalo=round(Hpalo/dz); %numero di piani x-y attraversati dal singolo pozzo
step_j=0; %indice per il salvataggio dello step temporale
h=zeros(nx+1,ny+1,nz+1); %matrice della soluzione
zz=zeros(nx+1,ny+1,nz+1); %matrice delle quote geometriche
for jjjjj=1:ny+1
for kkkkk=1:nz+1
zz(:,jjjjj,kkkkk)= -(x'*sind(a)-z(kkkkk)*cosd(a)); %quota geometrica di ogni elemento
end
componenteprofondita=round((psi-profonditaEFF)/hpalo*cosd(a)/dz)+1;
%componente del vettore z corrispondente alla profondita "profonditaEFF"
RX=D/cosd(a)/2;
RY=D/2;
%Semi-assi della sezione del pozzo nel piano x-y
```

Figura 3.16: inizializzazione del codice: generazione dei vettori e delle coordinate per il calcolo.

Dato che l'asse del pozzo rimane in ogni caso ortogonale alla direzione y , il semi-asse in tale direzione è pari al raggio del pozzo $D/2$. Nella direzione x invece, per effetto dell'inclinazione del pendio α ("a" nel codice numerico), il diametro del pozzo degenera nel semi-asse RX pari a $D/2 \cdot \cos(\alpha)$.

3.8.6 Condizione iniziale

L'assegnazione della condizione iniziale beneficia, in termini di semplicità di programmazione, del sistema di riferimento scelto, ruotato di un angolo α con asse di rotazione coincidente con l'asse y . Come già illustrato, la condizione iniziale è rappresentata da una quota costante su tutti i piani ortogonali al piano campagna. Nel riferimento scelto, ciò equivale a porre la quota piezometrica iniziale in funzione della sola variabile x .

La matrice tridimensionale delle quote piezometriche iniziali $h(i, j, k)$ (da questo momento, per semplicità di esposizione, la matrice $h(i, j, k)$ e tutte le matrici tridimensionali ausiliari analoghe (figura 3.17a) verranno riportate in grassetto) viene costruita per assemblaggio di sottostrutture monodimensionali $h(:, j, k)$ (figura 3.18b).

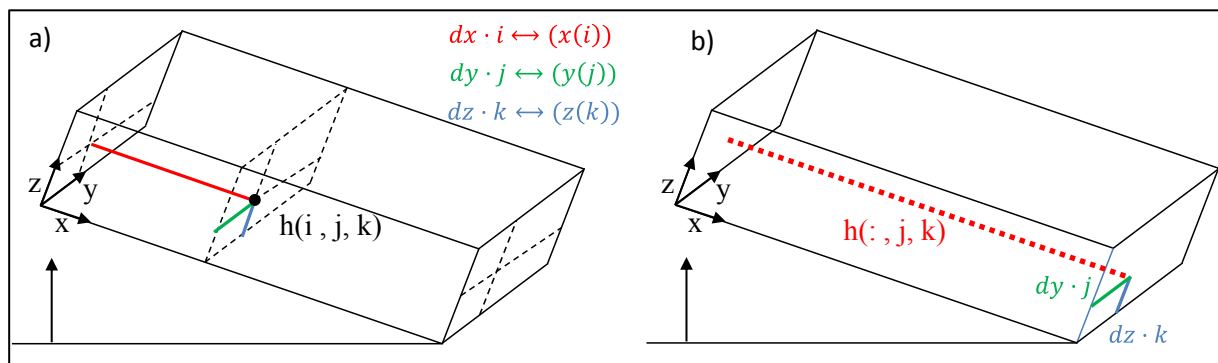


Figura 3.17: a) singolo elemento della matrice h ; b) sottostruttura monodimensionale con indici corrispondenti a quelli del vettore x .

```

%CONDIZIONE INIZIALE: flusso parallelo al piano campagna in un pendio inclinato
for k=1:nz+1
    for j=1:ny+1
        h(:,j,k)=LX*sind(a) + LZ*cosd(a) - x*sind(a);
    end
end
    
```

Figura 3.18: doppio ciclo for per l'assemblaggio della matrice delle condizioni iniziali.

Una volta assegnato il valore iniziale di h alla sottostruttura monodimensionale, un doppio ciclo for (figura 3.19) permette di eseguire questa operazione per tutti gli indici j e k , riempiendo così tutti gli spazi della matrice h (si noti che l'indice ":" individua tutti i punti appartenenti alla relativa dimensione ovvero, in questo caso tutti i punti da 1 fino a $nx+1$).

3.8.7 Condizioni di Dirichlet

Durante la fase di calcolo, sui bordi di monte $h(1, :, :)$ e di valle $h(nx+1, :, :)$ viene ripristinata ad ogni passo la quota piezometrica preesistente. La stessa operazione viene ripetuta per la superficie limite superiore, sulla quale viene mantenuta costante la condizione iniziale di quota piezometrica pari alla quota geometrica (condizione di lama d'acqua). Una volta creata la matrice delle condizioni iniziali, vengono generate da essa tre sottomatrici bidimensionali con i valori di h sui bordi considerati (figura 3.19). Come si vedrà in seguito ciò permette di assegnare ad ogni passo la condizione al contorno con una sola operazione matriciale, senza dover ricalcolare punto per punto il valore di h .

```
%CONDIZIONI AL CONTORNO:
g11=h(1, :, :);           %superficie di monte: carico costante
g2=h(nx+1, :, :);        %superficie di valle: carico costante
g3=h(:, :, nz+1);        %superficie superiore: lama d'acqua
```

Figura 3.19: matrici delle condizioni al contorno per i bordi sui quali si applica una condizione di Dirichlet.

3.8.8 Coordinate dei punti appartenenti ai pozzi

In questo paragrafo viene descritto il procedimento che permette di individuare i punti del dominio, e quindi i rispettivi elementi della matrice h , che appartengono al volume occupato dai drenaggi, in base alla geometria scelta in fase di input. Lo sviluppo di questa parte del codice ha richiesto diverse fasi di approfondimento. In un primo momento i pozzi venivano considerati ortogonali al piano campagna. In queste condizioni la traccia del cilindro, rappresentato dal pozzo, sul generico piano a quota z ($k \cdot dz$ nel modello discretizzato) è una circonferenza di diametro D . Si fa variare l'indice di z (nel codice in questo caso l'indice di z è "cc" come osservabile in figura 3.20) per tutti i piani situati al di sopra della profondità raggiunta dal pozzo. Per ognuno di questi piani si verifica, attraverso un *ciclo if*, che il punto $x(i), y(j)$ (rispettivamente con indici aa e bb nel codice) ricada all'interno della circonferenza di raggio $D/2$ e centro coincidente con l'asse del pozzo. I punti che soddisfano tale condizione vengono fatti corrispondere agli elementi di due matrici ausiliarie g e $g1$, delle stesse dimensioni di h . Alla fine del ciclo, la matrice g presenta i valori della quota geometrica, per i punti appartenenti al volume dei pozzi, e valori nulli per tutti gli altri punti. La matrice $g1$ presenta valori nulli per i punti appartenenti al volume dei pozzi, e valori unitari per tutti gli altri punti. Queste due matrici saranno usate in seguito, durante il ciclo di calcolo, per ripristinare la condizione di pressione nulla sui punti appartenenti ai drenaggi.

In un secondo momento questa parte del listato è stata modificata, in modo da tenere conto della verticalità dei pozzi. A tale scopo viene aggiunto un termine per tenere conto del fatto che il centro della circonferenza (traccia del cilindro-pozzo con il piano x - y a quota z) presenta coordinate x ed y differenti su ogni piano $z(k)$.

Infine, come già descritto, la verticalità del pozzo implica che la traccia della sua superficie cilindrica su un piano inclinato genera una ellisse in luogo di una circonferenza. Per tenere conto di questo aspetto è stata modificata ulteriormente la condizione di verifica del *ciclo if*, fino alla forma definitiva illustrata in figura 3.20.

3.8.9 Ciclo di calcolo alle differenze finite

In questo paragrafo viene illustrata la parte di codice in cui vengono implementate le equazioni alle differenze finite. La soluzione approssimata viene calcolata per successivi passi, a partire dalla soluzione relativa al passo precedente. In termini pratici ciò avviene attraverso l'utilizzo di un *ciclo for*. L'indice di tale ciclo varia per il numero complessivo di istanti in cui viene discretizzato il dominio del tempo. Il solo primo passo viene assegnato automaticamente prima che inizi il ciclo. Infatti se si definisce la condizione iniziale indisturbata come “step 0”, lo “step 1” è rappresentato dalla realizzazione dei pozzi, ipotizzata istantanea. Il processo di filtrazione, pertanto, si innesca a partire dallo “step 2”. Nel codice lo “step 1” viene realizzato assegnando la condizione di pressione neutra nulla ai punti interni al volume drenante. Ciò viene eseguito grazie alle matrici ausiliarie **g** e **g1**.

```
%MODELLAZIONE DEL POZZO DRENANTE: viene realizzata utilizzando l'equazione del cilindro.
g=zeros(nx+1,ny+1,nz+1);
g1=ones(nx+1,ny+1,nz+1);
%matrici ausiliarie per assegnare le condizioni sui punti appartenenti ai
%pozzi

for aa=1:nx+1
    for bb=1:(round(D/2/dy1)+1)
        for cc=(nz+1-round(npalo*cosd(a))):nz+1
            for nn=0:n/2
                if
                    %((x(aa)-(LX/2-nn*intlongadim))^2+y(bb)^2)<=(D/2)^2 |
                    %((x(aa)-(LX/2+nn*intlongadim))^2+y(bb)^2)<=(D/2)^2
                    %versione con pozzi ortogonali al piano campagna

                    %((x(aa)-(LX/2-nn*intlongadim)+(LZ-Hpalo*cosd(a)/2)*tand(a)-z(cc)*tand(a))^2+y(bb)^2)<=(D/2)^2 |
                    %((x(aa)-(LX/2+nn*intlongadim)+(LZ-Hpalo*cosd(a)/2)*tand(a)-z(cc)*tand(a))^2+y(bb)^2)<=(D/2)^2
                    %versione con pozzi verticali a sezione non circolare

                    (((x(aa)-(LX/2-nn*intlongadim)+(LZ-Hpalo*cosd(a)/2)*tand(a)-z(cc)*tand(a))^2/RX^2)
                    +(y(bb)^2/RX^2))<=1 |
                    (((x(aa)-(LX/2+nn*intlongadim)+(LZ-Hpalo*cosd(a)/2)*tand(a)-z(cc)*tand(a))^2/RX^2)
                    +(y(bb)^2/RX^2))<=1;
                    %equazioni dei cilindri per la determina dei punti
                    %appartenenti ai pozzi drenanti
                    g(aa,bb,cc)=(LX-x(aa))*sind(a)+z(cc)*cosd(a);
                    % condizione di pressione nulla sui punti appartenenti ai pozzi
                    g1(aa,bb,cc)= 0;
                    % la matrice g1 presenta valori nulli per tutti i punti
                    % che soddisfano l'equazione dei pozzi, e valori unitari
                    % su tutti gli altri punti

                end
            end
        end
    end
end
```

Figura 3.20: ciclo per la determinazione dei punti appartenenti ai pozzi.

La matrice \mathbf{h} dello step 0 viene prima moltiplicata, elemento per elemento, per la matrice \mathbf{gI} ; alla matrice risultante viene aggiunta, sempre elemento per elemento, la matrice \mathbf{g} . Ricordando come sono strutturate le matrici \mathbf{g} e \mathbf{gI} , questa operazione equivale a sostituire, solo per gli elementi appartenenti ai pozzi, i valori di h allo step 0 con quelli delle relative quote geometriche, il che equivale ad assegnare una condizione di pressione neutra nulla.

Una volta assegnata la condizione di drenaggio, parte il *ciclo for* che aggiorna ad ogni passo la matrice delle quote piezometriche \mathbf{h} . Ad ogni istante il software calcola, per blocchi, tutte le componenti di \mathbf{h} tramite operazioni tra sottomatrici. Uno schema tridimensionale di tali sottomatrici è illustrato in figura 3.21a. Mentre in figura 3.21b viene riportata una “sezione” della matrice \mathbf{h} con la nomenclatura utilizzata per le diverse regioni.

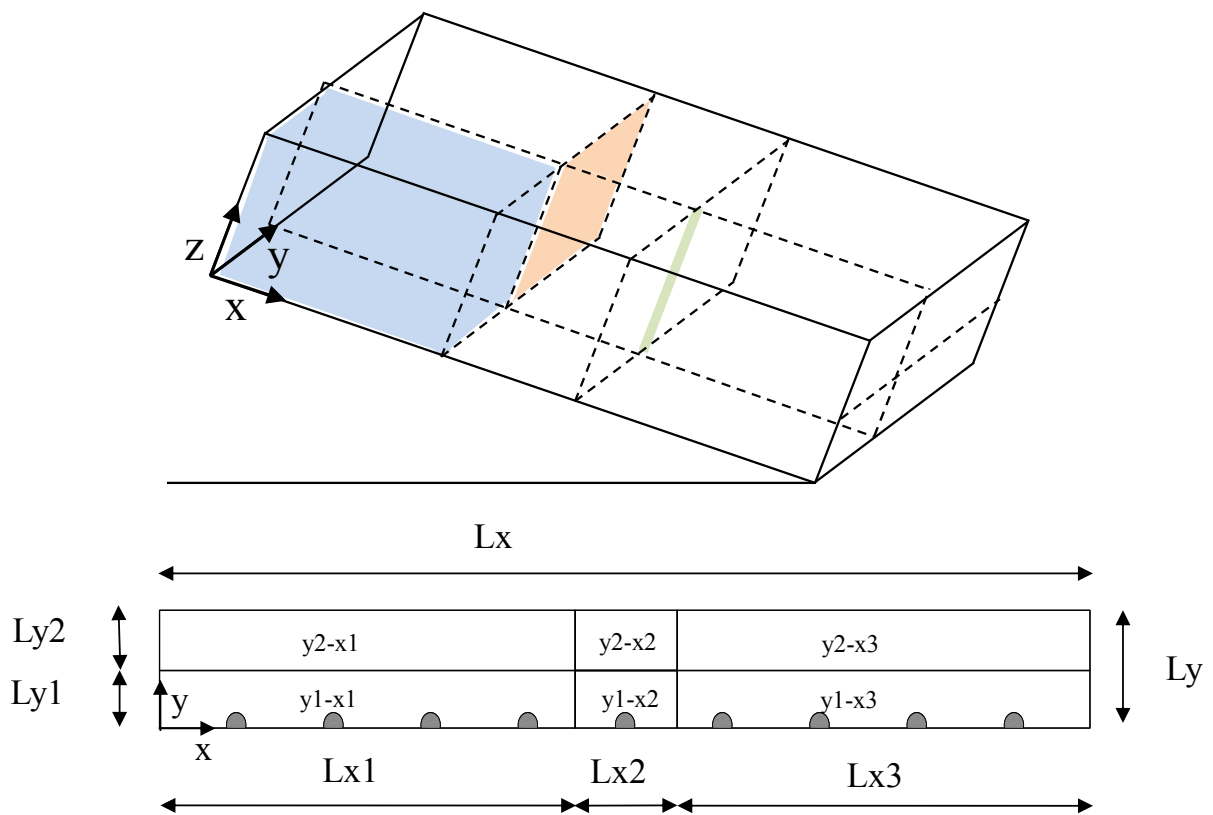


Figura 3.21: a) schema tridimensionale della matrice \mathbf{h} in cui sono evidenziate una regione (azzurro), un piano di interfaccia tra due regioni (arancio) e un segmento di interfaccia tra quattro regioni (verde); b) nomenclatura assegnata alle varie regioni.

La sequenza di calcolo prevede 15 operazioni di cui:

- 6 equazioni del tipo evidenziato in azzurro (figura 3.22) per i punti interni alle sei regioni;
- 7 equazioni che sfruttano la formula per griglie non uniformi, del tipo evidenziato in arancio (figura 3.22), per le sottomatrici bidimensionali che contengono i punti

appartenenti ai piani di interfaccia tra le regioni. L'operazione, in questo caso, vede coinvolti i punti dei piani adiacenti, interni alle regioni che si interfacciano. Poiché questi termini sono già coinvolti nelle operazioni descritte al punto precedente, i loro valori risulterebbero già aggiornati al j -mo passo mentre la formula richiede i valori al passo $j-1$ mo. Per ovviare a tale problema questi dati vengono preliminarmente salvati in 6 matrici ausiliarie, rigenerate immediatamente all'inizio di ogni passo;

- 2 equazioni con la formula per griglie uniformi, del tipo evidenziato in verde (figura 3.22), per le sottomatrici monodimensionali che contengono i punti appartenenti ai segmenti di interfaccia tra quattro regioni.

```
% Ciclo di calcolo alle Differenze Finite
h=h.*g1+g;

for j=2:nt+1

    hmashpiccy=h(:,ny1,2:end-1);
    hmashgrany=h(:,ny1+2,2:end-1);

    hmashpiccx1=h(nx1+2,:,2:end-1);
    hmashgranx1=h(nx1,:,2:end-1);

    hmashpiccx2=h(nx1+nx2,:,2:end-1);
    hmashgranx2=h(nx1+nx2+2,:,2:end-1);

    %FDM per la regione x1y1
    h(2:nx1,2:ny1,2:end-1)=
    rxx1*(h(1:nx1-1,2:ny1,2:end-1)+h(3:nx1+1,2:ny1,2:end-1))
    +(1-2*rxx1)*h(2:nx1,2:ny1,2:end-1)
    +ryy1*(h(2:nx1,1:ny1-1,2:end-1)+h(2:nx1,3:ny1+1,2:end-1))
    +rz*(h(2:nx1,2:ny1,1:end-2)+h(2:nx1,2:ny1,3:end));

    %FDM mesh variabile per il piano di interfaccia tra le regioni: %x1y2-x2y2
    h(nx1+1,ny1+2:end-1,2:end-1)=
    (1-2*(ryy2+rz))*h(nx1+1,ny1+2:end-1,2:end-1)
    +cv*dt*2*(hmashpiccx1(:,ny1+2:end-1,:)-(1+s1)*h(nx1+1,ny1+2:end-1,2:end-1)
    +s1*hmashgranx1(:,ny1+2:end-1,:))/(s1*dx1^2*(1+s1))
    +ryy2*(h(nx1+1,ny1+1:end-2,2:end-1)+h(nx1+1,ny1+3:end,2:end-1))
    +rz*(h(nx1+1,ny1+2:end-1,1:end-2)+h(nx1+1,ny1+2:end-1,3:end));

    %FDM mesh variabile per il segmento x2x3y1y2
    h(nx1+nx2+1,ny1+1,2:end-1)=
    (1-2*rz)*h(nx1+nx2+1,ny1+1,2:end-1)
    +cv*dt*2*(hmashpiccy(nx1+nx2+1,:)-(1+l1)*h(nx1+nx2+1,ny1+1,2:end-1)
    +l1*hmashgrany(nx1+nx2+1,:))/(l1*dy2^2*(1+l1))
    +cv*dt*2*(hmashpiccx2(:,ny1+1,:)-(1+s2)*h(nx1+nx2+1,ny1+1,2:end-1)
    +s2*hmashgranx2(:,ny1+1,:))/(s2*dx3^2*(1+s2))
    +rz*(h(nx1+nx2+1,ny1+1,1:end-2)+h(nx1+nx2+1,ny1+1,3:end));
```

Figura 3.22: ciclo FDM: fase di aggiornamento della matrice h .

Una volta terminate queste 15 operazioni, rimangono da aggiornare le condizioni al contorno (figura 3.23).

Per i contorni sui quali sono state imposte condizioni di Dirichlet, ovvero sui bordi di monte e di valle e sul piano campagna, vengono ripristinati i valori di h precedentemente salvati in apposite matrici (figura 3.19). Per i punti appartenenti ai pozzi, viene ripetuta la stessa operazione già effettuata al primo passo. Sui piani impermeabili, i valori di h vengono posti uguali a quelli calcolati sui piani immediatamente adiacenti ad ogni passo di calcolo.

```
%CONDIZIONI AL BORDO da riassegnare al termine di ogni step di calcolo.

h(:,:,nz+1)=g3;           %bordo superiore: lama d'acqua h=z
h(1,:,:) =g11;            %superficie di monte: h costante
h(nx+1,:,:) =g2;          %superficie di valle: h costante
h(:,:,1)=h(:,:,2);        %bordo inferiore : flusso nullo
h(:,1,2:nz)=h(:,2,2:nz);  %asse di simmetria: flusso nullo
h(:,ny+1,2:nz)=h(:,ny,2:nz); %asse di simmetria: flusso nullo
h=h.*g1+g;                %pozzo drenante h=z
```

Figura 3.23: ripristino delle condizioni al contorno e di drenaggio.

La precedente operazione equivale ad imporre una condizione di gradiente nullo nella direzione ortogonale alla superficie considerata.

L'operazione che chiude il j -mo ciclo di calcolo è riportata in figura 3.24. Questa operazione verifica lo stato di avanzamento temporale dell'operazione di calcolo.

```
ZZ=zz(:,:, [1:4:nz+1 componenteprofondita]);
%ZZ è la matrice delle quote geometriche solo sui piani per i quali viene
%salvato Ht.
Z=Z([1:4:nz+1 componenteprofondita])
%Z è il vettore delle coordinate z, solo sui piani per i quali viene
%salvato Ht.

%Genera la matrice dell'efficienza:
%l'indice di riga è per le le diverse profondità dal
%piano campagna, quello di per colonna differenti step di tempo
Et=zeros(length(Z),length(Ht.data)+1);
Et(:,1)=psi-(Z*hpalo/cosd(a));
for jz=1:length(Z)
    for jj=1:length(Ht.data)
        u=Ht.data{jj}-ZZ;
        Ax=trapez(y,u,(nx/2+1- round(intlongadim/2/dx2):nx/2+1+ round(intlongadim/2/dx2),:,jz),2);
        Vtot=u(1,ny,jz)*((length(Ax)-1)*dx2)*LY;
        Vu=Vtot-trapez(Ax)*dx2;
        Ej=Vu/Vtot;
        Et(jz,jj+2)=Ej;
    end
end
```

Figura 3.24: operazioni di calcolo dell'efficienza idraulica.

Quando si raggiungono gli istanti di tempo per i quali si è deciso di salvare i dati, questi vengono immagazzinati in una matrice strutturata **Ht**. Si noti che, per motivi legati alla quantità di memoria, vengono salvati solo i dati su piani *x-y* preliminarmente fissati.

3.9 Output del codice

In questo paragrafo vengono riportati alcuni esempi di output che il codice numerico sviluppato è in grado di fornire, tenendo sempre presente gli obbiettivi prefissati per il presente lavoro: da un lato integrare la letteratura con strumenti semplici per il dimensionamento dei sistemi di pozzi drenanti; dall'altro analizzare e comprendere al meglio il processo indotto dal sistema.

L'utilizzo di uno strumento molto potente come il software Matlab permette di gestire la fase di post-processing in maniera piuttosto varia.

Dal punto di vista pratico interessa il valore dell'efficienza su una generica superficie. Questo calcolo può essere realizzato con l'ausilio di una piccola routine (figura 3.25). Fornendo la profondità della superficie a cui si fa riferimento si ottengono il valore e l'andamento nel tempo dell'efficienza (figura 3.26).

L'efficienza viene calcolata, su diverse superfici e per tutti gli istanti di tempo che vengono salvati, risolvendo con il metodo dei trapezi l'equazione:

$$\overline{E}_T(\infty) = \frac{\int_T [u_0 - \bar{u}(\infty)] ds}{\int_T u_0 ds}$$

```

% Salvataggio di una serie di matrici h nel PRIMO ANNO
% dall'esecuzione dell'opera

if mod(j,round((nt+1)/anni/step1anno))== 0 && j < round((nt+1)/anni)
    step_j=step_j+1;
    Ht.data{step_j}=h(:,:, [1:4:nz+1 componenteprofondita]) ;
end

% Salvataggio di una serie di matrici h negli ANNI SUCCESSIVI al
% primo fino al tempo finale.

if mod(j,round((nt+1)/anni/step2anno))== 0 && j >= round((nt+1)/anni)
    step_j=step_j+1;
    Ht.data{step_j}=h(:,:, [1:4:nz+1 componenteprofondita]) ;
end
end
%-----

```

Figura 3.25: salvataggio dei dati della matrice **h**.

La superficie I' sulla quale l'efficienza viene calcolata è evidenziata in arancio in figura 3.7. Le sue dimensioni sono $i \cdot s/2$; essa è compresa all'interno della zona $y1-x2$ caratterizzata dalla mesh più fitta. Si noti che, nel calcolo, i punti appartenenti alla sezione del pozzo drenante sono considerati a pressione nulla.

Per analizzare il comportamento qualitativo del sistema e l'affidabilità della soluzione fornita dal codice, è possibile realizzare diverse tipologie di grafici. Il più interessante consiste nella distribuzione delle pressioni neutre su una superficie parallela al piano campagna (figura 3.27).

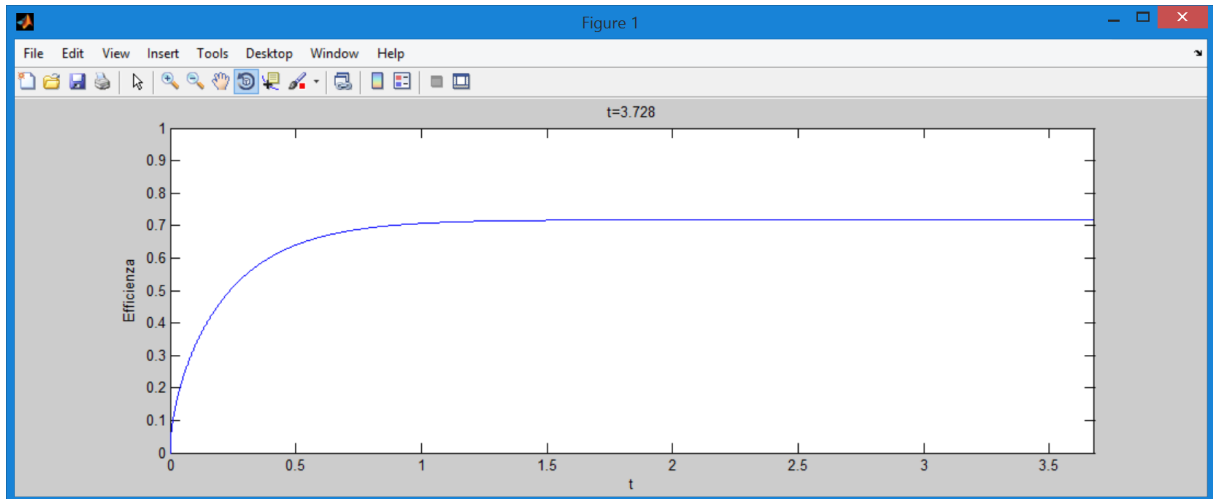


Figura 3.26: tipico andamento dell'efficienza nel tempo (inteso come fattore tempo) su una generica superficie.

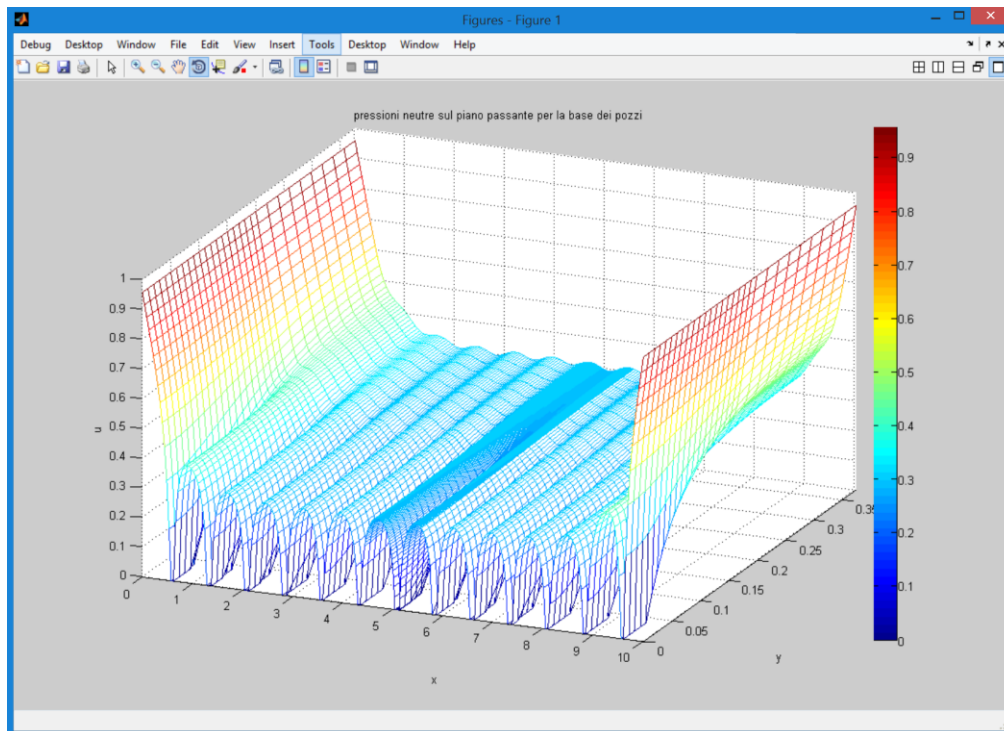


Figura 3.27: pressioni neutre su una superficie passante per la base dei pozzi.

L'analisi del grafico di fig. 3.27 è stata determinante durante la fase di sviluppo del codice numerico. Infatti la maggior parte degli errori commessi in fase di programmazione sono emersi controllando l'andamento delle pressioni ad ogni passo di calcolo. In figura 3.28 si riporta un esempio di errore tipico che avviene se non è garantita la stabilità del metodo. Il fatto che l'errore avvenga nella zona in cui la mesh è più fitta è un indizio chiaro di problemi legati alla stabilità. In questo caso l'errore commesso era uno scambio dei parametri della mesh.

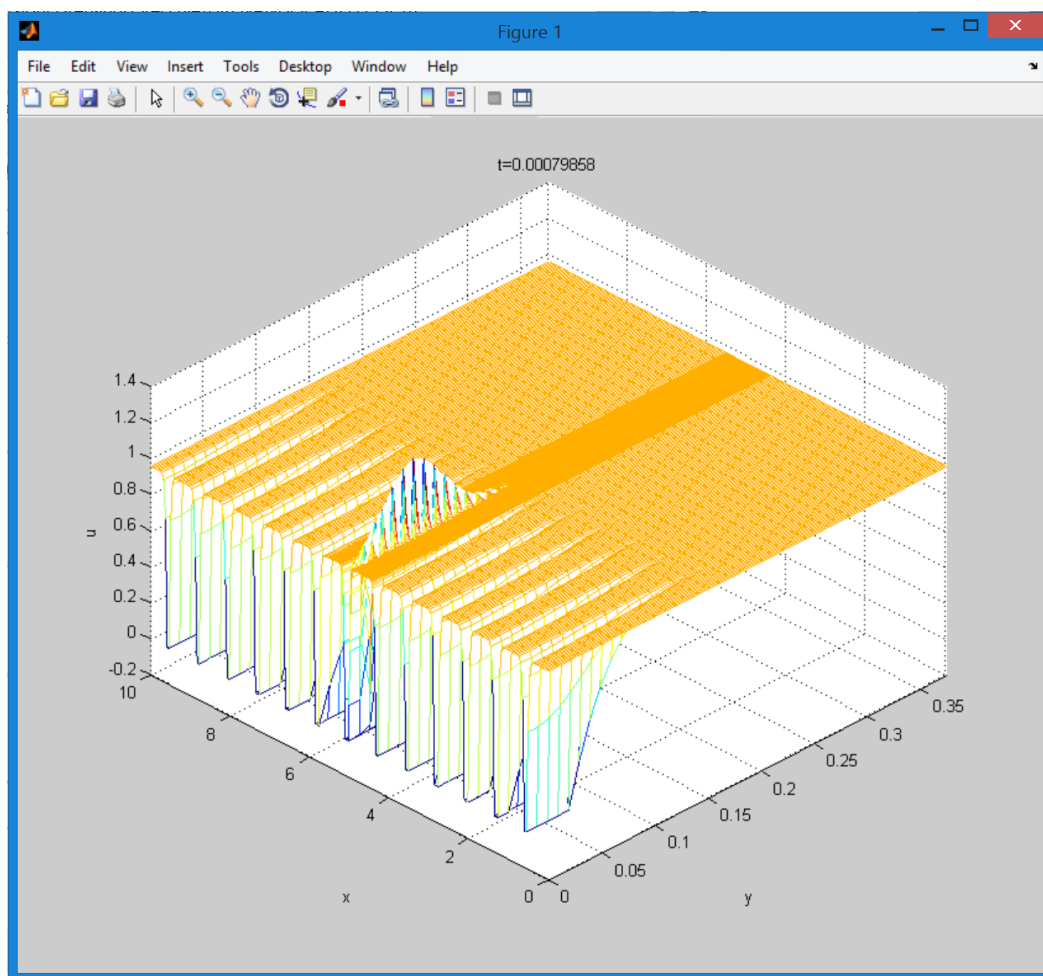


Figura 3.28: tipico errore di calcolo dovuto al mancato rispetto della condizione di stabilità.

3.10 Validazione del codice numerico

Per validare il codice numerico sono state condotte diverse analisi i cui risultati sono stati confrontati con quelli di modelli simili disponibili in letteratura.

Le prime analisi sono state condotte su un modello di diffusione del calore e confrontate con le relative soluzioni analitiche disponibili in letteratura. Questo approccio è possibile grazie alla analogia fra il processo termico e quello di filtrazione idraulica (sotto il profilo fisico-matematico).

I casi presi in considerazione (Carslaw 1959, Peng 2002) riguardano un modello di flusso nello spazio che si sviluppa dalla superficie esterna di un cilindro indefinito tenuto ad una temperatura costante. La condizione iniziale è di temperatura nulla. Essendo lo spazio infinito, nella soluzione analitica la condizione ai bordi estremi può essere immaginata di temperatura nulla su una superficie cilindrica di raggio infinito con asse coincidente con quello del cilindro riscaldato. In figura 3.29a è rappresentata una generica sezione con le condizioni iniziali e al contorno del problema analitico risolto dai due autori. Il modello numerico utilizzato per riprodurre lo stesso fenomeno è rappresentato in figura 3.29b insieme alle condizioni iniziali e al contorno adottate. Geometria e condizioni al contorno per i tre modelli confrontati sono riassunte nelle tabelle 3.3 e 3.4.

Il primo autore (Carslaw) ottiene la soluzione mediante lo sviluppo della trasformata di Laplace, mentre il secondo (Peng) utilizza un metodo in parte analitico ed in parte numerico.

I risultati sono stati rappresentati nelle figure 3.29c e 3.29d: si nota come il modello discretizzato (i cui risultati sono i punti) sia in grado di descrivere lo stesso comportamento del modello analitico (i cui risultati sono le curve continue) in termini di temperatura ed in funzione della distanza dalla superficie riscaldata, per diversi istanti di tempo. La soluzione ottenuta vale per il generico raggio considerato, ciò dimostra che nonostante si tratti di un modello concepito per un caso tridimensionale esso è in grado di simulare anche un processo chiaramente monodimensionale sotto adeguate condizioni al contorno.

Ulteriori analisi di validazione sono state effettuate su un modello di trincee drenanti; i risultati sono stati confrontati con le soluzioni disponibili in letteratura (Desideri et al., 1997) già citate nel capitolo riguardante lo stato dell'arte.

Il modello analizzato da Desideri et al. (figura 3.30) prende in esame una condizione di flusso bidimensionale. Il piano campagna è orizzontale e le condizioni iniziali sono idrostatiche con superficie libera coincidente con il piano campagna. Le soluzioni al problema sono state ottenute dagli autori con il codice di calcolo FLAC 2D. Anche in questo caso per la fase transitoria gli autori hanno utilizzato l'analogia con il processo di diffusione del calore risolvendo il problema termico equivalente.

Nelle tabelle 3.3 e 3.4 sono riassunte la geometria e le condizioni al contorno considerate nelle analisi utilizzate per il confronto dei risultati. Si noti come per poter passare dal sistema di pozzi al sistema di trincee sia bastato semplicemente imporre l'interasse nella direzione di massima pendenza pari al diametro dei pozzi. Nella direzione ortogonale sono stati considerati diversi interassi in modo da ottenere più punti da poter confrontare con le soluzioni di Desideri et al. che sono proposte in forma di abachi.

La differenza che si ottiene dal confronto è molto piccola (figura 3.31). Infatti è noto che a parità di efficienza, l'interasse di progetto fornito dagli abachi in questione è leggermente minore rispetto a quello fornito dalle soluzioni tridimensionali proposte da Stanic (1984).

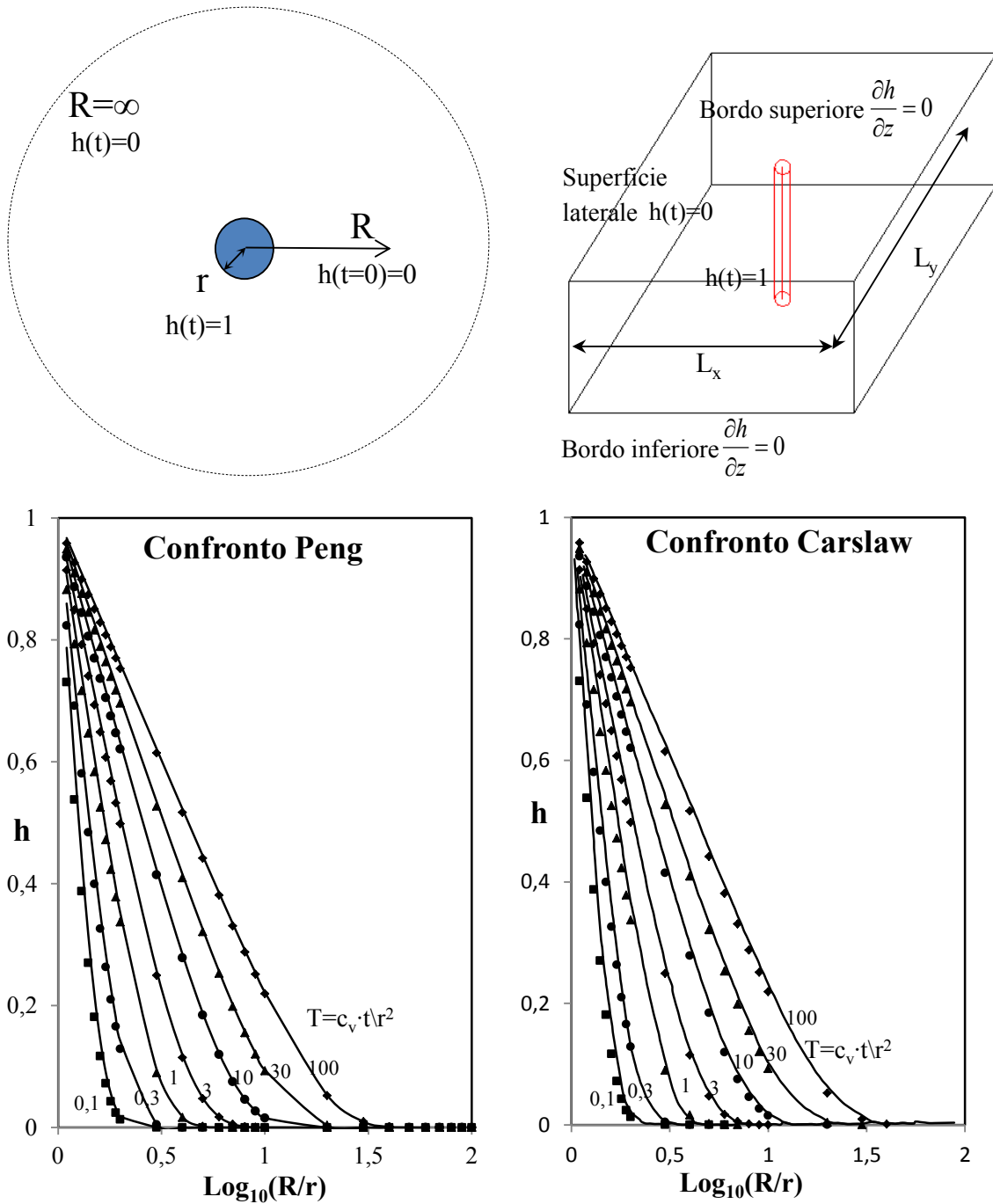


figura 3.29: confronto tra il modello analitico (curve continue) e numerico (punti): a) sezione del cilindro indefinito considerato da Peng e Carslaw (monodimensionale); b) dominio considerato nel modello numerico; c) confronto dei risultati ottenuti con quelli ottenuti da Peng; d) confronto dei risultati ottenuti con Carslaw. A diverse curve corrispondono diversi istanti di tempo.

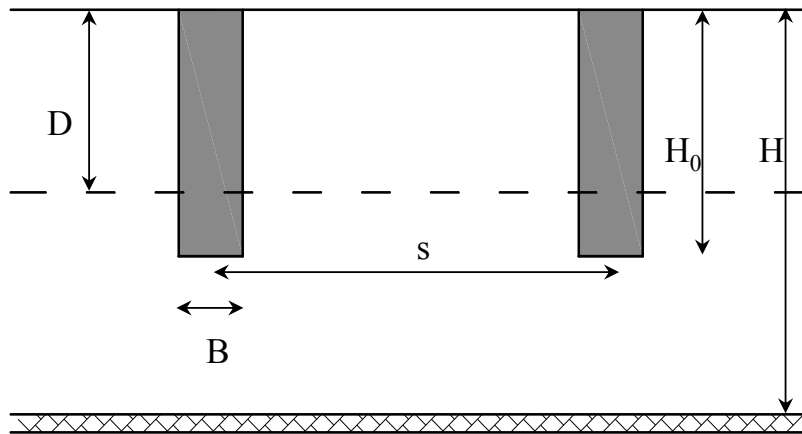
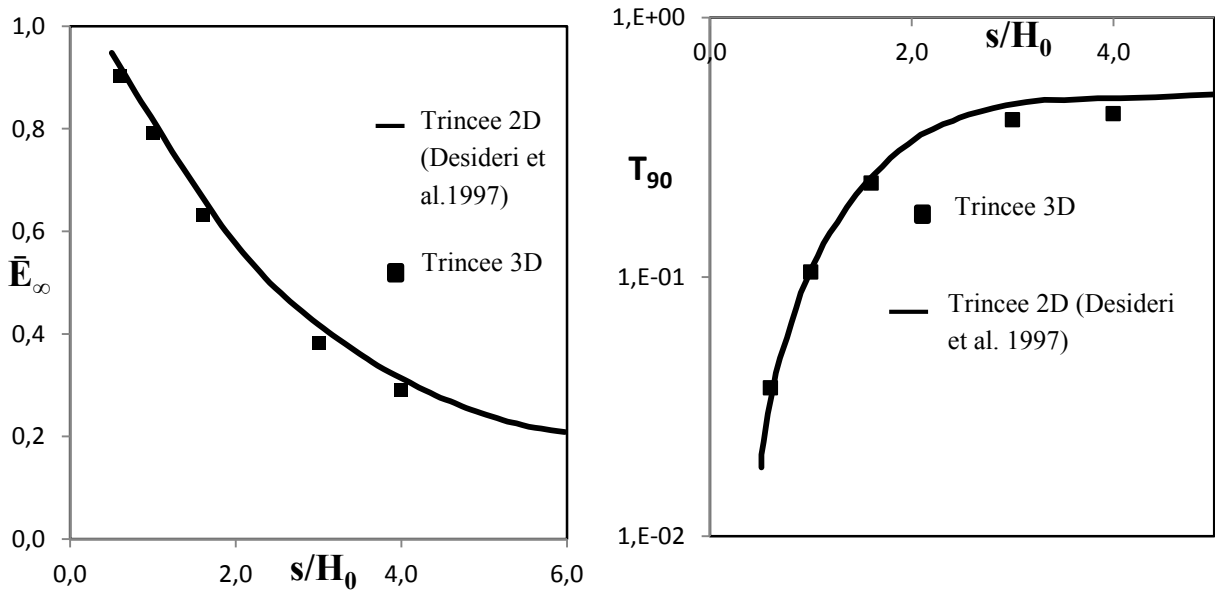


Figura 3.30: confronto tra trincee 2D (Desideri et al, 1997) e 3D: schema analizzato.


 Figura 3.31: confronto tra trincee 2D (Desideri et al., 1997) e 3D: a) efficienza in regime stazionario; b) fattore di tempo T_{90} .

	Geometria									Materiale
	L	Lx	Ly	s	i	α	d	H ₀	H	c_v
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[°]	[m]	[m]	[m]	[m ² /s]
Peng	-	50	50	-	-	-	1	2	2	-
Carslaw	-	50	50	-	-	-	1	2	2	-
Desideri	100	-	-	10, 15 ; 25 ; 45 ; 60	1,6	10	1,6	10	10	1x10-6

Tabella 3.3: dati geometrici utilizzati nelle analisi di validazione.

	Condizioni al contorno						Condizione iniziale
	superiore	inferiore	monte	valle	laterale	drenaggi	
Peng	$dh/dz=0$	$dh/dz=0$	$h=0$	$h=0$	$h=0$	$h=1$	$h=0$
Carslaw	$dh/dz=0$	$dh/dz=0$	$h=0$	$h=0$	$h=0$	$h=1$	$h=0$
Desideri	$h=\zeta$	$dh/dz=0$	$h=h_0$	$h=h_0$	$dh/dz=0$	$h=\zeta$	$h=h_0$

Tabella 3.4: condizione iniziale e condizioni al contorno utilizzate nelle analisi di validazione.

4 Dimensionamento di sistemi reticolari di pozzi

4.1 Introduzione

In questo capitolo vengono riportati e commentati i risultati di una serie di analisi parametriche, sulla base dei quali sono stati realizzati gli abachi adimensionali che permettono un dimensionamento speditivo del sistema di pozzi drenanti in condizioni stazionarie, nonché gli abachi che consentono di stimare i tempi di ingresso in esercizio.

4.2 Ottimizzazione del sistema di pozzi drenanti

Il comportamento di un sistema di pozzi drenanti, caratterizzato dalla geometria descritta al capitolo precedente e riproposta in figura 4.1, è influenzato da numerose grandezze. Effettuare uno studio parametrico, tenendo conto di ognuna di esse, richiede la realizzazione di un elevatissimo numero di analisi. Peraltro, per rappresentare i risultati ottenuti, si dovrebbe produrre un altrettanto elevato numero di grafici. Un tale approccio, benché completo, risulterebbe poco pratico.

Per ovviare a questo problema, si è deciso di effettuare alcuni studi preliminari, tesi ad individuare la geometria che ottimizza il funzionamento del sistema. Un approccio del genere è già stato utilizzato da altri autori (Desideri et al. 1997), per la realizzazione di abachi per il progetto di dreni sub-orizzontali.

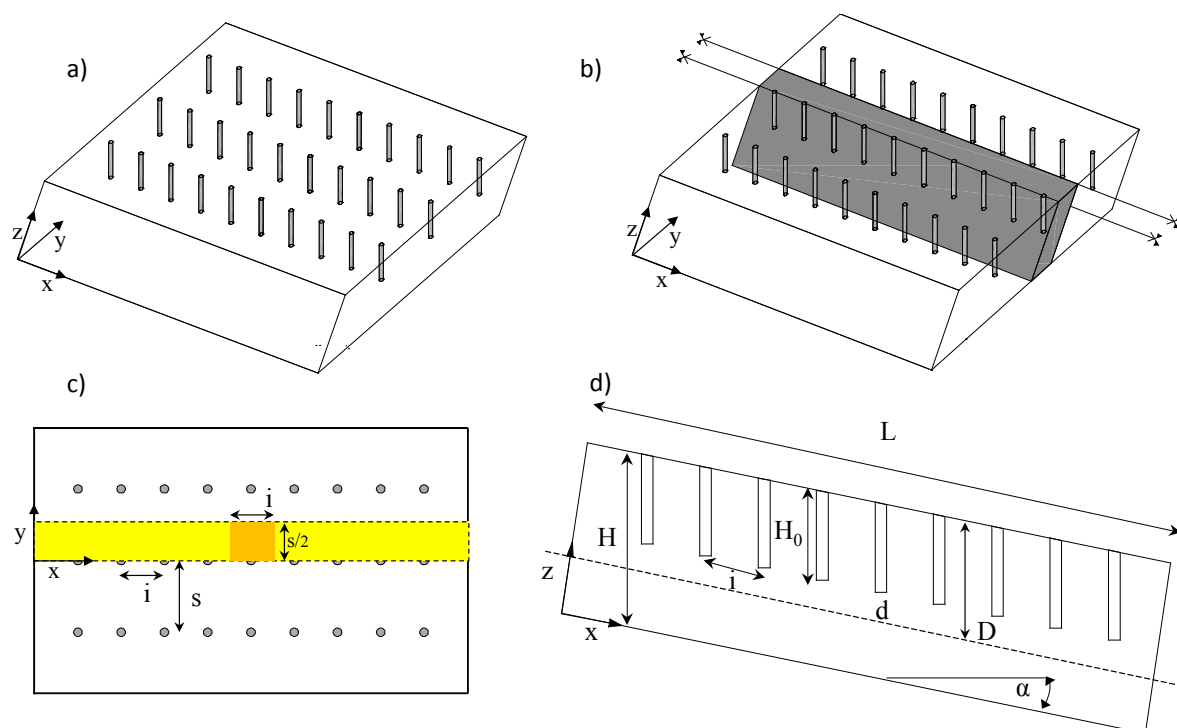


Figura 4.1: geometria del sistema di pozzi drenanti analizzato e rappresentazione grafica delle grandezze geometriche.

Dal confronto tra il sistema di pozzi e quello di trincee drenanti è emerso che queste ultime sono in genere ridondanti. I risultati già illustrati al §2.5.3.3 mostrano chiaramente come, utilizzando i pozzi in luogo delle trincee, si perviene ad una notevole aumento del rapporto tra efficienza e volumi (e quindi indirettamente costi) delle opere di drenaggio. Tali considerazioni sono state supportate da alcune analisi in cui era stato fatto variare l'interasse tra i pozzi i nella direzione di massima pendenza del pendio, e mantenuto costante l'interasse nella direzione ortogonale s (ossia quella delle curve di livello). Il problema a questo punto è stato capire quale fosse il "limite" superiore di questa ottimizzazione. Per indagare questo aspetto sono state eseguite analisi in cui è stato variato il rapporto tra i due interassi i ed s lasciando invariato il prodotto. In altre parole poiché i pozzi sono disposti in maniera tale da creare una rete, è stata indagata l'efficienza del sistema a parità di area della singola maglia, facendone variare soltanto la forma. In tabella 4.1 sono riassunte alcune delle analisi effettuate per il caso in cui il rapporto tra l'area della maglia ed il quadrato dell'altezza del pozzo è pari a 0.5.

# Analisi	L	H ₀	H	d	i	s	i·s	i/s	\bar{E}_{∞} (D=10m)
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[-]	[%]
1	120	10	10	1	16,66	3	50	5,55	55,2
2	120	10	10	1	3	16,66	50	0,18	55,5
3	120	10	10	1	7,14	7,14	50	1	67,8
4	120	10	10	1	10	5	50	2	66,1
5	120	10	10	1	5	10	50	0,5	66,3

Tabella 4.1: dati utilizzati nelle analisi per valutare l'effetto forma di una rete di pozzi.

Osservando l'andamento (figura 4.2) si evince che il valore massimo dell'efficienza si ottiene per valori del rapporto i/s pari ad 1. Questo significa che, a parità di volumi di materiale drenante posto in opera e di volume di terreno da drenare, il massimo di efficienza si ottiene realizzando una rete di pozzi a maglia quadrata.

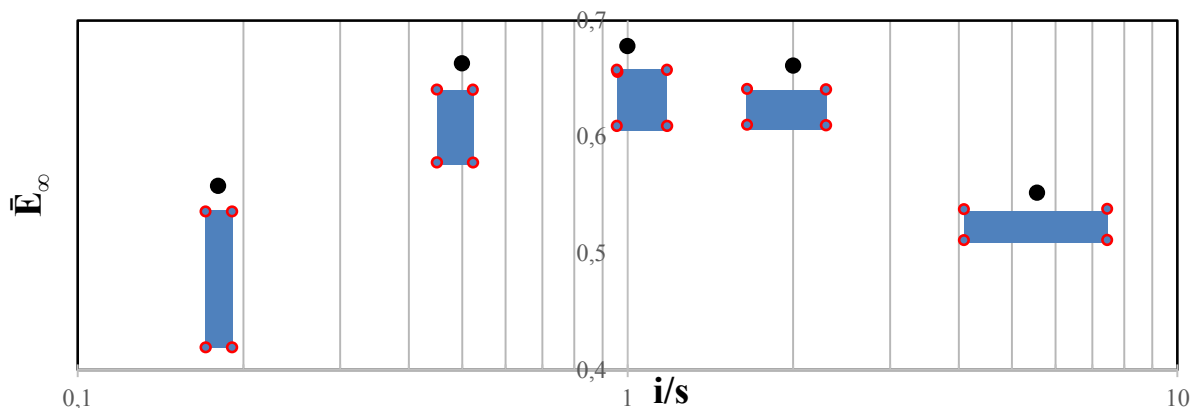


Figura 4.2: andamento dell'efficienza in funzione del rapporto i/s (dati in tabella 4.1).

In particolare più il rettangolo è allungato meno efficiente risulta il sistema. Considerato che, man mano che la generica maglia si allunga, il sistema di pozzi degenera in un sistema di trincee, si evince ancora una volta che queste ultime rappresentano la soluzione tecnologica meno efficiente.

Inoltre si osserva che l'efficienza non dipende dalla direzione in cui viene disposta la maglia di pozzi. Quest'ultima evidenza lascia intendere che l'angolo di inclinazione del pendio considerato (10°) non abbia alcun effetto in termini di efficienza del sistema drenante.

Per approfondire questo aspetto sono state effettuate ulteriori analisi in cui, a parità di altre condizioni, è stato fatto variare solo l'angolo α (tabella 4.2).

# Analisi	L	H ₀	H	d	i	s	i/s	α	\bar{E}_∞ (D=10m)
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[°]	[%]
1	120	10	10	1	16,66	3	5,55	0	34,07
2	120	10	10	1	3	16,66	0,18	10	34,90
3	120	10	10	1	7,14	7,14	1	20	36,01
4	120	10	10	1	10	5	2	30	37,92

Tabella 4.2: dati utilizzati nelle analisi per valutare l'effetto dell'inclinazione nel pendio sull'efficienza del sistema di pozzi.

A conferma di quanto ipotizzato i risultati hanno mostrato che una variazione di α compresa tra 0° e 20° ha uno scarso effetto sull'efficienza idraulica del sistema. Del resto tale evidenza era già stata messa in luce dalle soluzioni di Stanic (1984) illustrate nel precedente capitolo. Le efficienze ottenute per i quattro angoli di acclività considerati, vengono riportate in figura 4.3 in funzione delle profondità della superficie a cui viene eseguito il calcolo. L'efficienza aumenta in maniera quasi impercettibile all'aumentare dell'acclività del pedio, pertanto la soluzione per piano di campagna orizzontale è a vantaggio di sicurezza ma non eccessivamente conservativa. Questo tipo di rappresentazione, oltre a mettere in risalto la scarsa influenza dell'angolo di inclinazione del pendio, permette di cogliere un comportamento tipico delle opere di drenaggio: si noti come appena superata la profondità raggiunta dai pozzi (10 m in questo caso) si verifichi una brusca riduzione dell'efficienza del sistema.

4.3 Analisi parametriche

In base ai risultati ottenuti, è emerso che il sistema di drenaggio con pozzi raggiunge il suo massimo livello di efficienza quando le maglie della rete hanno una forma quadrata. Inoltre si è riscontrato una scarsa influenza dell'angolo di inclinazione del pendio, specie per i valori degli angoli più frequenti nei problemi di natura pratica (10 - 20°).

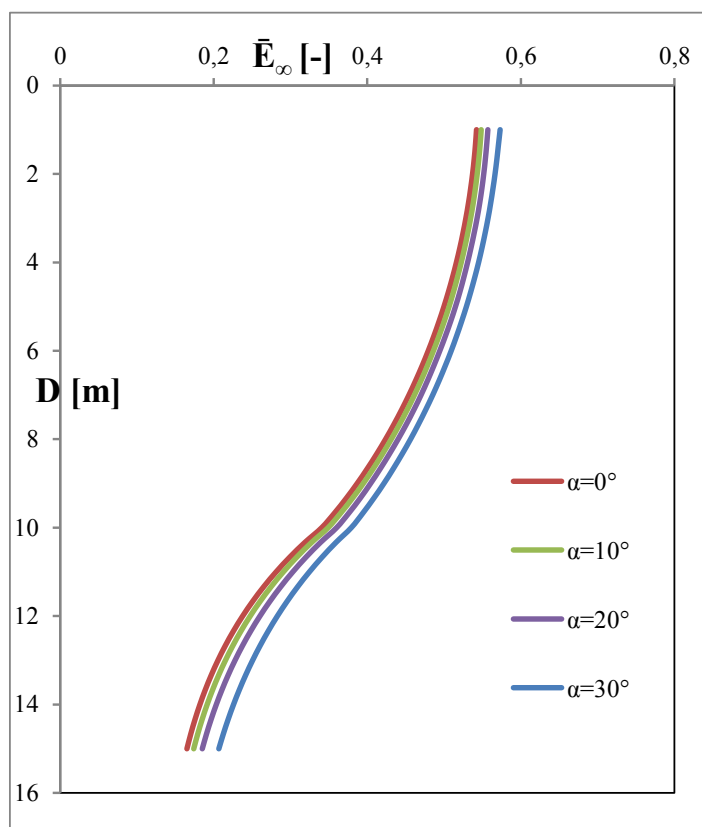


Figura 4.3: andamento dell'efficienza in funzione della profondità della superficie considerata D , per diversi angoli di inclinazione del pendio α (dati in tabella 4.2).

La riduzione del numero di parametri da considerare, una volta che il calcolo è stato svincolato da α e si è assunto $i=s$, ha semplificato notevolmente le analisi parametriche.

In definitiva sono state eseguite 75 analisi che hanno fornito 135 valori di efficienza in condizioni stazionarie. In tabella 4.3 sono riportati gli intervalli di variazione dei parametri considerati, scelti in modo da ricoprire un ampio spettro di possibili applicazioni pratiche. Le condizioni al contorno e le condizioni iniziali sono state già descritte al capitolo precedente e qui vengono riassunte in tabella 4.4.

Geometria							Materiale
L	s	i	α	d	H_0	H	c_v
[m]	[m]	[m]	[°]	[m]	[m]	[m]	[-]
100	$s=i$	2,5 ; 5 7,5 ; 10 12,5 ; 15 17,5 ; 20 ; 22,5	10	0,6 ; 0,9 1,2 1,5 1,8	10	10 15 25	1×10^{-6}

Tabella 4.3: geometria utilizzata nelle analisi parametriche.

Condizioni al contorno						Condizioni Iniziali
superiore	inferiore	monte	valle	laterale	pozzi	
$h=\zeta$	$dh/dz=0$	$h=h_0$	$h=h_0$	$dh/dy=0$	$h=\zeta$	$h=h_0$

Tabella 4.4: condizioni iniziali e condizioni al contorno utilizzate nelle analisi parametriche.

4.4 Abachi per il dimensionamento del sistema reticolare a maglie quadre

I risultati della analisi parametriche vengono riportati in due tipologie di abachi, simili a quelli già disponibili per altre tecnologie drenanti. I primi riportano i valori dell'efficienza in condizioni stazionarie e si possono utilizzare per dimensionare l'interasse tra i pozzi. I secondi tengono conto dell'evoluzione dell'efficienza durante la fase transitoria e permettono di stimare i tempi di ingresso in esercizio del sistema.

4.4.1 Condizioni stazionarie

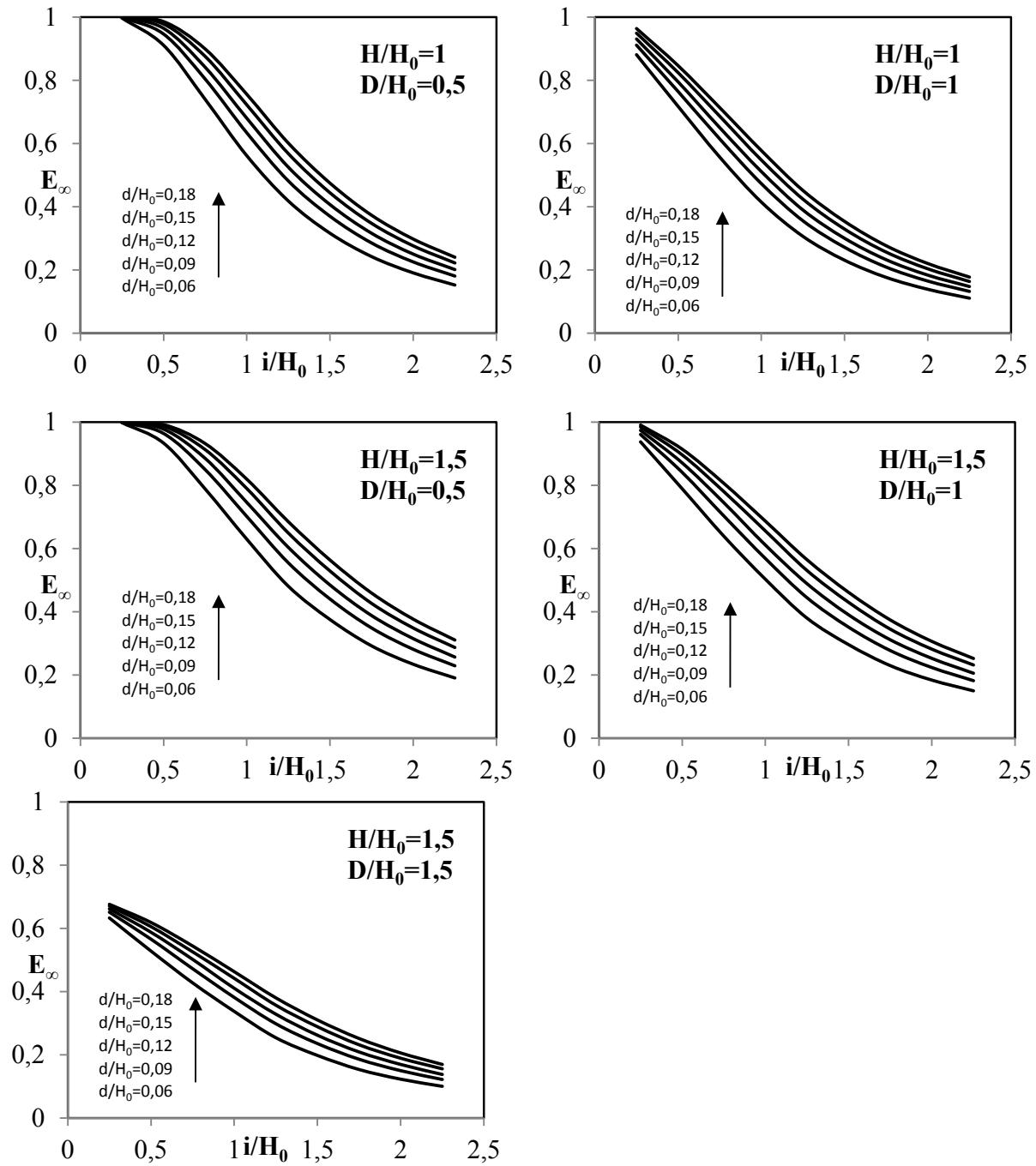
L'efficienza in condizioni stazionarie è riportata in funzione del valore dell'interasse adimensionalizzato rispetto alla profondità del pozzo. Ognuno degli abachi (figura 4.4) presenta diverse curve per diversi rapporti tra il diametro e la profondità del pozzo. In questo modo si tiene conto dell'effetto della snellezza del pozzo sul suo funzionamento.

Gli altri parametri analizzati sono: profondità del substrato impermeabile e profondità del piano di valutazione dell'efficienza idraulica.

Analizzando i valori diagrammati si possono fare diverse osservazioni.

L'assenza di punti angolosi e discontinuità è un ottimo indice della buona qualità del calcolo, infatti gli andamenti sono molto coerenti con quelli fisicamente attesi sulla base del comportamento di altri sistemi drenanti.

L'aspetto più evidente e scontato è la riduzione dell'efficienza all'aumentare del lato, e quindi dell'area, della generica maglia di pozzi. Tuttavia è molto interessante studiare il gradiente e la concavità delle curve riportate negli abachi. Quasi in tutti i casi il gradiente è massimo per valori di i/H_0 compresi tra 0,5 e 1. Probabilmente questi sono i valori che ottimizzano l'effetto dei pozzi rispetto al processo di consolidazione tridimensionale. Non appare casuale, tra l'altro, il fatto che per i/H_0 pari a 1, il volume di terreno compreso tra 4 pozzi corrisponde ad un cubo. Infatti sebbene questo caso non possa essere paragonato a quello della consolidazione monodimensionale studiato da Terzaghi, è evidente che il percorso che la particella d'acqua "più sfavorita" deve compiere per dissipare la sovrappressione neutra nel generico punto è minimo nel caso di una forma regolare come appunto è il cubo, posto che gli elementi drenanti siano disposti negli spigoli.



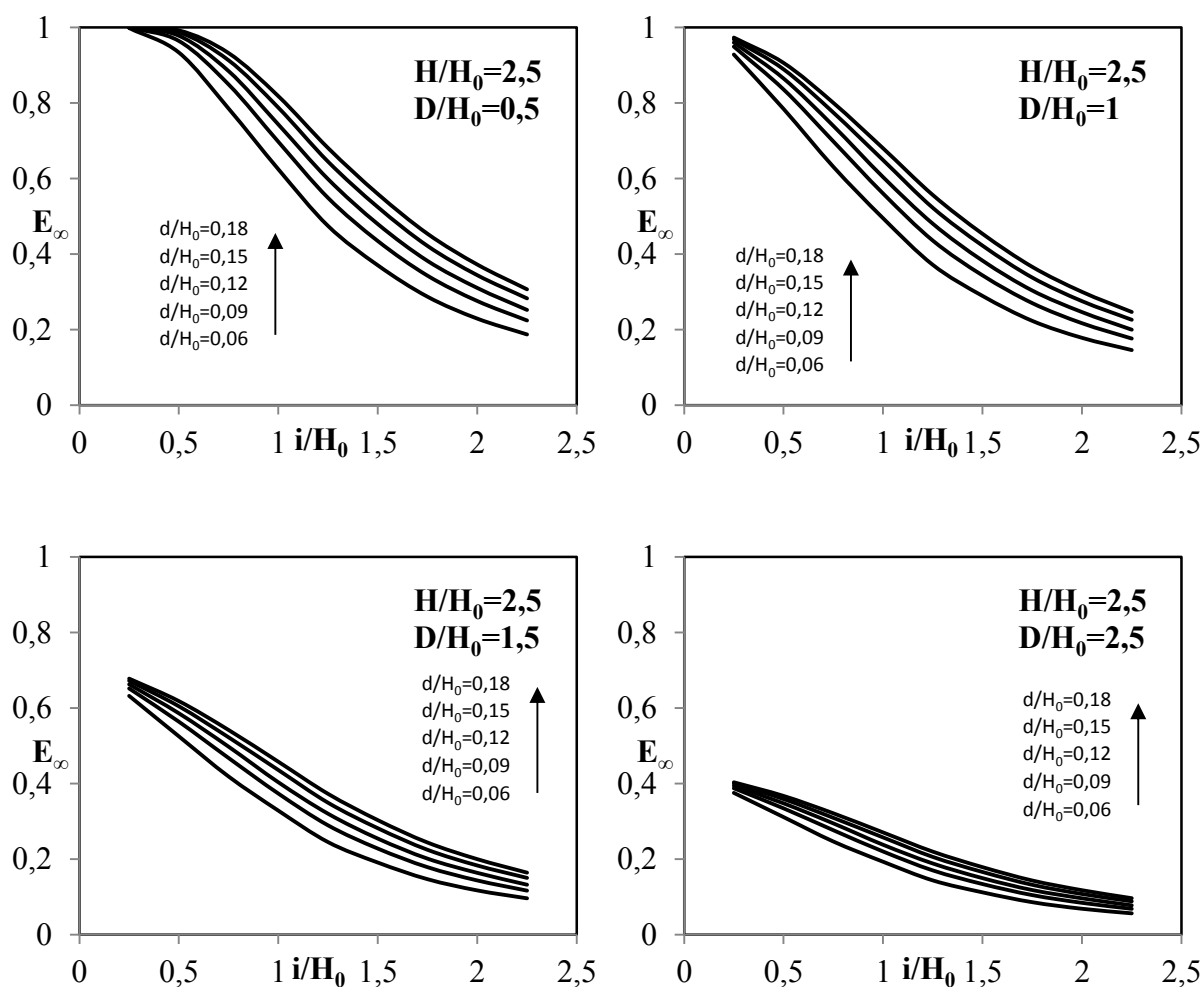


Figura 4.4: abachi per il progetto di sistemi di pozzi drenanti a rete con maglie quadrate.

Un altro aspetto che la rappresentazione scelta mette bene in evidenza è l'influenza del diametro del pozzo d sull'efficienza. Come era lecito immaginare, l'efficienza aumenta per valori via via crescenti di d/H_0 . Passando dal limite inferiore a quello superiore dell'intervallo di variazione del parametro d/H_0 (0.06 – 0.18) si registrano incrementi di efficienza fino addirittura al 20%. Va detto che solo un'aliquota di questo guadagno è da attribuire ad una variazione del regime di flusso; l'altra aliquota è dovuta in maniera più diretta alla sostituzione di un maggior volume di terreno con del materiale drenante a pressione neutra nulla. Infatti nel calcolo dell'efficienza entra la pressione media su un piano che può anche intersecare la sezione drenante, sulla quale le pressioni nulle sono imposte. Invero quando si analizzano superfici poste ad una profondità superiore a quella raggiunta dai pozzi la differenza legata al diametro del pozzo si riduce, in quanto l'efficienza tiene conto solo della differenza di pressioni neutre che si genera per effetto del flusso verso il dreno.

Altro aspetto interessante riguarda il fatto che la massima differenza di efficienza tra pozzi più o meno snelli si ottiene in corrispondenza delle massime concavità delle curve per valori di i/H_0 compresi tra 0,5 e 1,5.

Per quanto riguarda gli altri parametri coinvolti (D/H_0 ed H/H_0), la scelta della rappresentazione non è ottimale per comprenderne in maniera intuitiva l'influenza sul processo di drenaggio. Dovendo effettuare una scelta di rappresentazione si è cercato di dare più importanza ai parametri che influenzano maggiormente il comportamento tridimensionale, come il diametro e il lato della singola maglia di pozzi, in accordo con gli obiettivi della ricerca. Inoltre gli effetti della profondità alla quale viene calcolata l'efficienza D e della profondità del substrato impermeabile H sono gli stessi che si hanno nel caso di trincee drenanti già analizzate da altri autori (Desideri et al., 1997).

In particolare l'efficienza si riduce man mano che vengono considerate superfici più profonde. Passando da superfici che intersecano i pozzi a superfici poste al di sotto di essi, si ha una drastica riduzione dell'effetto benefico del sistema drenante. Questo aspetto già noto in letteratura è di certo un notevole incentivo all'utilizzo di tecnologie drenanti adatte a raggiungere in maniera agevole la superficie instabile (come i sistemi di pozzi drenanti).

Per quanto riguarda l'effetto del substrato impermeabile, l'aspetto più significativo è l'aumento di efficienza che si ottiene incrementando la sua profondità H . In questo caso infatti, soprattutto quando si calcola l'efficienza su superfici poste ad una profondità D prossima a quella dei pozzi, vi è una componente di flusso verso il basso che altrimenti sarebbe impedita (se i pozzi si attestassero sul/nel substrato impermeabile), e come è noto genera una riduzione di pressione neutra. Quando la superficie impermeabile passa proprio per la base dei pozzi l'acqua a valle del dreno può essere addirittura costretta a risalire lungo il piano impermeabile, con componenti dirette verso l'alto, generando una riduzione di efficienza.

4.4.2 Condizioni transitorie

I tempi di ingresso in esercizio vengono riportati in abachi adimensionali sotto forma di fattore tempo (figura 4.5):

$$T = \frac{c_v}{H_0^2} \cdot t$$

In particolare il fattore tempo T_{90} , necessario al raggiungimento del 90% dell'efficienza a regime, viene espresso in funzione del valore dell'interasse adimensionalizzato rispetto alla profondità del pozzo. Anche in questo caso ogni abaco presenta diverse curve per diversi rapporti tra il diametro e la profondità del pozzo. L'influenza degli altri parametri è rappresentata replicando gli abachi.

Un'analisi degli andamenti rappresentati conduce ad una serie di considerazioni.

Per prima cosa, a differenza dei dati ottenuti per le efficienze stazionarie, in questo caso le curve presentano alcune irregolarità. Ciò è dovuto essenzialmente al fatto che, durante le analisi, il salvataggio dei dati avviene solo per determinati istanti. In particolare durante il primo anno vengono effettuati 8 salvataggi temporalmente equidistanti, mentre per gli anni successivi ne vengono effettuati soltanto 2. Pertanto i valori del T_{90} sono stati calcolati

interpolando linearmente i dati salvati il che, data la notevole differenza di velocità dei processi (che richiedono addirittura una rappresentazione in scala logaritmica), conduce ad inevitabili errori di precisione. Nonostante ciò, le irregolarità che si riscontrano sono molto contenute, anzi, gli andamenti sono certamente coerenti con la fisica del reale processo di drenaggio. Inoltre, se si tiene conto che questi valori devono essere intesi come una stima dei tempi di ingresso in esercizio, tali irregolarità non pregiudicano affatto la qualità della stima.

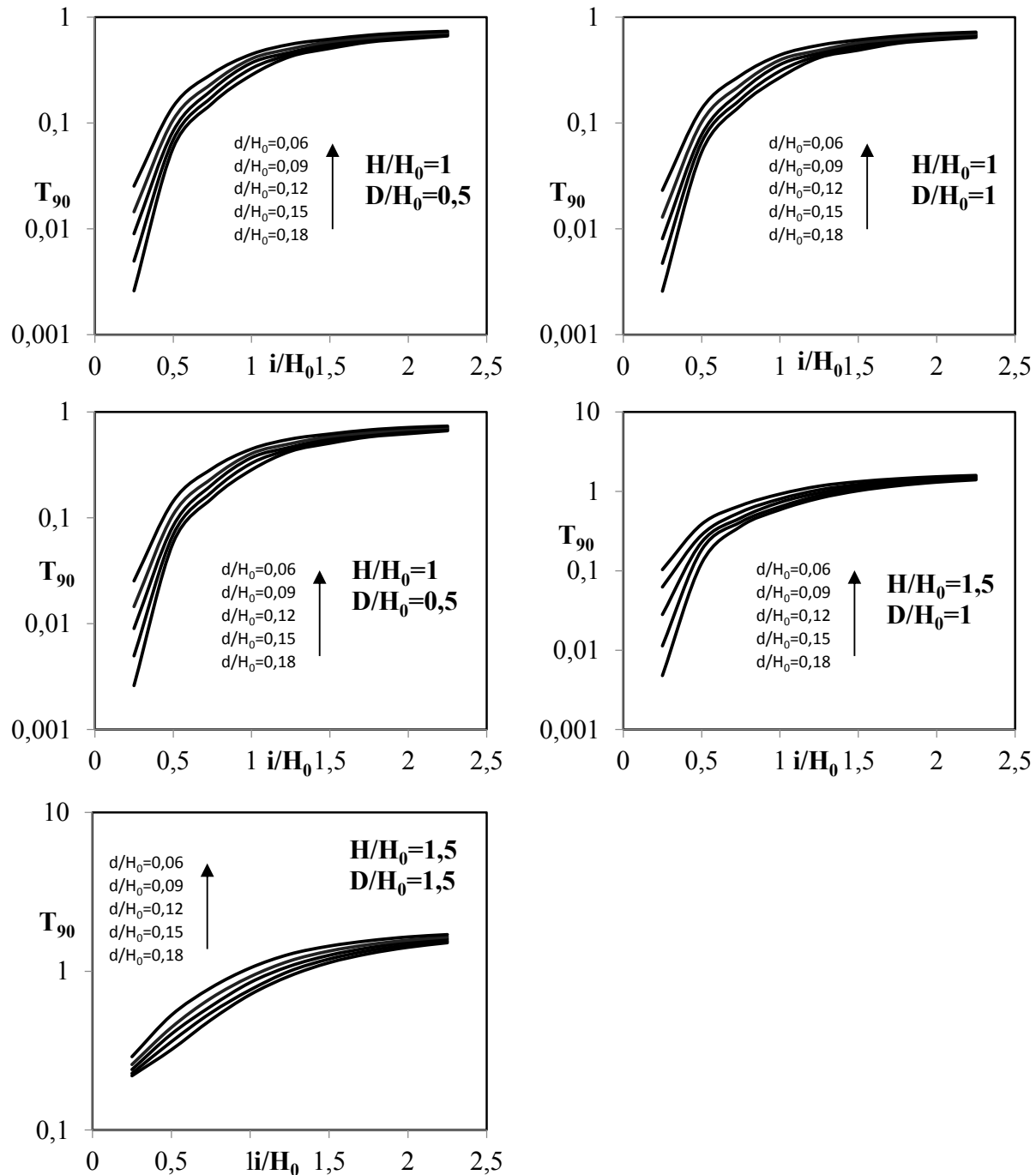
Come detto, gli andamenti sono coerenti con la fisica del processo. Analizzando i singoli grafici si può desumere l'influenza che ha la distanza tra i pozzi sulla velocità del processo di drenaggio. In particolare, all'aumentare dell'interasse adimensionalizzato i/H_0 e quindi dell'area della maglia determinata dai pozzi, il processo è notevolmente più lento. Il motivo di tale comportamento è da ricercare in diversi fenomeni: aumentando l'area della maglia aumentano volume di terreno da drenare e le distanze delle particelle più sfavorite dai contorni drenanti, il che implica gradienti inferiori e quindi velocità di flusso ridotte.

Le stesse conclusioni posso essere tratte analizzando l'influenza del rapporto di snellezza dei pozzi d/H_0 . In questo caso, aumentando il diametro del pozzo, a parità di altri parametri, aumenta la superficie drenante e di conseguenza aumentano i gradienti che regolano il flusso. Ciò si traduce in una maggiore velocità del processo di drenaggio ed in valori di T_{90} inferiori.

Per quanto riguarda le profondità adimensionali D/H_0 , si noti che non si tratta di un vero e proprio parametro geometrico che influenza il sistema. Esso rappresenta soltanto la profondità della superficie sulla quale si calcola l'efficienza richiesta all'opera. Da un punto di vista fisico, prevedere l'effetto di D/H_0 non è così intuitivo come risulta per i/H_0 e d/H_0 . Mentre per i piani posti a profondità superiori rispetto a quella raggiunta dai pozzi è possibile giungere alla conclusione che all'aumentare della profondità considerata il processo è più lento, non è altrettanto intuitivo comprendere l'evoluzione del processo per valori $D/H_0 < 1$. Non è possibile infatti prevedere il comportamento del sistema facendo riferimento alle distanze delle particelle più sfavorite dalle superfici drenanti; se si considera una verticale, parallela all'asse dei pozzi, la distanza dei suoi punti dalla superficie drenante non dipende dalla profondità. Ciò potrebbe indurre a pensare che per valori di $D/H_0 < 1$ l'evoluzione del processo possa essere la stessa indipendentemente da D . Le analisi parametriche mostrano, invece, che il processo è sempre più veloce in prossimità del piano campagna, anche se le differenze non sono così accentuate come quelle osservabili per valori di $D/H_0 > 1$.

La causa di tale comportamento dipende dal fatto che, nonostante i valori di efficienza siano maggiori per superfici più prossime al piano campagna, le variazioni di quota piezometrica a regime sono molto più piccole rispetto ai piani posti a profondità maggiori, in particolare su quelli prossimi alla base dei pozzi. Da un punto di vista puramente numerico, la maggiore velocità di convergenza alla soluzione stazionaria per i piani più superficiali, è dovuta alla minore distanza dal bordo superiore dove è assegnata una condizione di Dirichlet (lama d'acqua).

L'ultima osservazione è quella sulla profondità della superficie impermeabile H . Come era lecito aspettarsi, la maggiore profondità della superficie impermeabile implica un dominio più grande e quindi, in ogni caso, tempi più lunghi per il processo di drenaggio. Ciò dipende dal fatto che la parte inferiore del dominio, compresa tra la base del pozzo e la superficie impermeabile, rallenta le variazioni di quota piezometrica nella parte superiore.



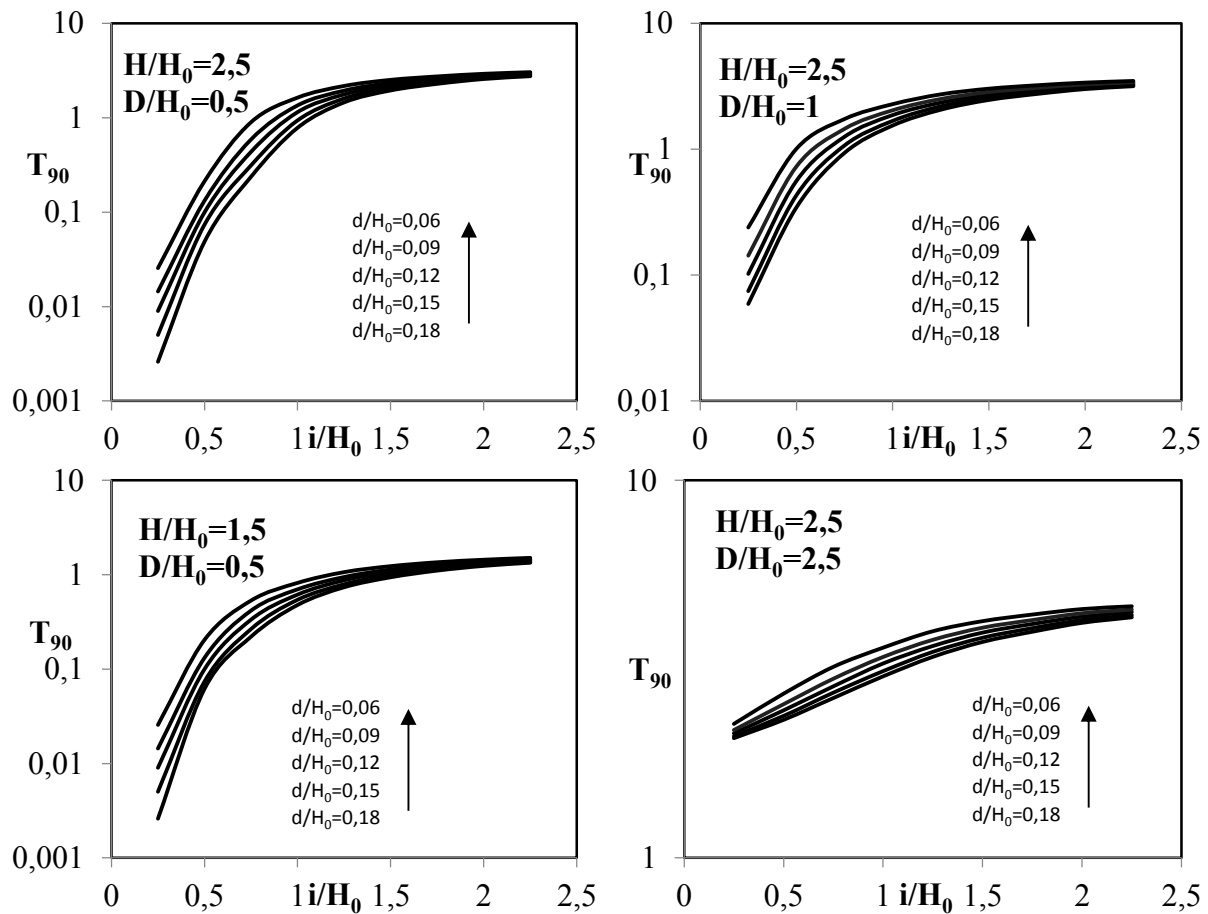


Figura 4.5: fattore di tempo T_{90} per la stima dei tempi di ingresso in esercizio del sistema di pozzi drenanti a maglie quadrate.

Per comprendere meglio tale concetto, si consideri l'analogia del problema della filtrazione con quello della diffusione del calore, regolate dalle stesse equazioni. Nel caso della diffusione, immaginando che il pozzo sia un cilindro riscaldato, la parte di dominio posta sotto la sua base, assorbe calore dalla zona sovrastante rendendo più lento il processo che porta alla condizione di equilibrio stazionaria. Invertendo il processo, immaginando che il pozzo sia un cilindro freddo, i gradienti, e pertanto i flussi si invertono, ma l'effetto è esattamente lo stesso. In questo caso la zona sottostante continua a fornire calore alla zona più prossima ai pozzi rallentandone il processo di raffreddamento che porterebbe all'equilibrio. Quest'ultimo caso è perfettamente analogo al caso dei drenaggi e spiega quanto si osserva dai risultati delle analisi.

5 Interazione dei pozzi drenanti con le fluttuazioni stagionali della falda

5.1 Introduzione

Nella progettazione delle opere di drenaggio, come in gran parte delle opere dell'ingegneria civile, si prediligono le ipotesi di progetto più cautelative fra tutte quelle che hanno una significativa probabilità di verificarsi. Da questo punto di vista, l'ipotesi di lama d'acqua al piano campagna rappresenta senza dubbio la condizione più sfavorevole per un pendio suscettibile di movimenti franosi determinati dalla fluttuazione delle pressioni neutre. Sembrerebbe quindi ragionevole far sempre riferimento alla presenza di lama d'acqua. L'obiettivo dello studio non è sempre fornire strumenti utili alla progettazione delle opere; talvolta esso ha per scopo la comprensione dei fenomeni osservati oppure la ricerca delle cause che hanno determinato tali fenomeni. In questi casi il modello non deve essere semplice e cautelativo come richiesto in fase di progettazione ma il più aderente possibile alla realtà fisica, anche a costo di divenire complesso.

In questo capitolo si affronta l'analisi del comportamento dei pozzi drenanti in presenza di fluttuazioni stagionali delle pressioni neutre. Verranno descritte le variazioni introdotte nel modello già illustrato per tenere conto delle nuove condizioni al contorno. Come in precedenza verranno riportati i passi che hanno permesso di implementare queste modifiche nel codice di calcolo. Infine verranno illustrati e discussi i risultati ottenuti.

5.2 Modellazione del sistema di drenaggio in presenza di fluttuazioni stagionali delle pressioni neutre

Al fine di valutare l'efficienza del sistema di pozzi drenanti in presenza di oscillazioni stagionali delle pressioni neutre è necessaria una sostanziale modifica della modellazione già descritta, ed in particolare una modifica della condizione assunta sulla superficie limite superiore del dominio considerato, oltre che una modifica della condizione assunta per i pozzi drenanti.

L'ipotesi di lama d'acqua al piano campagna, corrispondente ad una quota piezometrica costante $h=\zeta$, ovvero a pressione neutra costante $u=0$, viene sostituita con una condizione di quota piezometrica variabile nel tempo con legge sinusoidale. La nuova condizione, in termini di pressioni neutre al piano campagna prevede la formazione di una lama d'acqua ($u=0$, $h=\zeta$) per un breve istante della stagione umida (quando la pressione attinge il valore massimo), mentre regnano valori negativi durante la stagione secca, con un minimo pari a $u=-A$ ($h=\zeta-A$). La durata del periodo P è annuale (figura 5.1).

Tali processi sono particolarmente importanti quando si analizzano problemi di franosità relativi a strati superficiali o addirittura molto superficiali, in cui la suzione e con essa la coesione apparente, assumono un ruolo determinante per la stabilità.

Nel caso delle frane da scivolamento, tipiche dei terreni argillosi, le superfici di scorrimento sono quasi sempre situate sotto il pelo libero della falda, ossia nel dominio in cui regnano le pressioni neutre positive.

5.3 Implementazione in Matlab

In questo paragrafo vengono riportate e commentate le modifiche apportate al listato dei comandi implementato in Matlab, per tenere conto della condizione al contorno variabile.

5.3.1 Condizione al contorno superiore

Al termine di ogni passo temporale di calcolo con indice j (si veda §3.8.9) devono essere riassegnate le condizioni al contorno. Per tutti i piani che delimitano lateralmente ed inferiormente il dominio, le condizioni rimangono quelle già illustrate per condizione di lama d'acqua. Ai termini della matrice h , cui corrispondono i punti appartenenti al piano campagna, viene assegnata la quota piezometrica, calcolata come somma della quota geometrica (indipendente dal tempo) e del valore della pressione neutra (funzione periodica del tempo e dell'ampiezza) al j -esimo istante di tempo (figura 5.2).

```
%CONDIZIONI AL BORDO da riassegnare al termine di ogni step di calcolo.

h(:, :, nz+1)=zz(:, :, nz+1)-(A/hpalo)+(A/hpalo)*cos(2*pi/(T/anni)*t(j));
%bordo superiore: h variabile tra zz e zz-A
h(1, :, :)=g11; %superficie di monte: h costante
h(nx+1, :, :)=g2; %superficie di valle: h costante
h(:, :, 1)=h(:, :, 2); %bordo inferiore: flusso nullo
h(:, 1, 2:nz)=h(:, 2, 2:nz); %piano di simmetria: flusso nullo
h(:, ny+1, 2:nz)=h(:, ny, 2:nz); %piano di simmetria: flusso nullo
```

Figura 5.2: ripristino delle condizioni sui bordi che delimitano il dominio.

5.3.2 Condizione sui punti appartenenti al volume drenante: superficie di filtrazione

La condizione da assegnare ai punti appartenenti ai pozzi è stata già descritta dal punto di vista concettuale. Le superfici laterali dei pozzi per la parte al di sopra del pelo libero della falda vengono trattate alla stregua di “superfici di filtrazione”. L'implementazione in Matlab delle condizioni relative alla superficie di filtrazione rappresenta l'operazione più complessa nell'analisi del sistema con condizione al contorno superiore variabile. Come detto, la porzione di pozzo situata al di sopra del livello di falda deve essere considerata impermeabile. In questo caso, tuttavia, non può essere applicato lo stesso approccio adottato per i punti

appartenenti alle altre superfici impermeabili (bordo inferiore e piani di simmetria). Infatti, per come sono definiti, i punti “drenanti” non appartengono necessariamente alla superficie esterna del pozzo, ma soddisfano la condizione di essere interni o al più coincidenti con tale superficie (figura 5.3). In tali condizioni non può essere definita una normale alla superficie e la condizione di flusso nullo, richiesta dal modello, è stata applicata ricorrendo ad un “escamotage” che permette di considerare un “flusso mediamente nullo” lungo la superficie laterale del pozzo drenante. Esso consiste nell’assegnare nei punti interni un valore della quota piezometrica h corrispondente al valore medio della stessa quota calcolata nei punti immediatamente esterni alla sezione drenante. Tali punti (in blu in figura 5.3) vengono automaticamente individuati sulla base del seguente requisito: la loro equazione discretizzata (eq 3.6) contiene, tra i termini relativi ai punti adiacenti calcolati all’istante precedente (schema in figura 3.6), almeno un valore di h relativo ad uno dei punti interni.

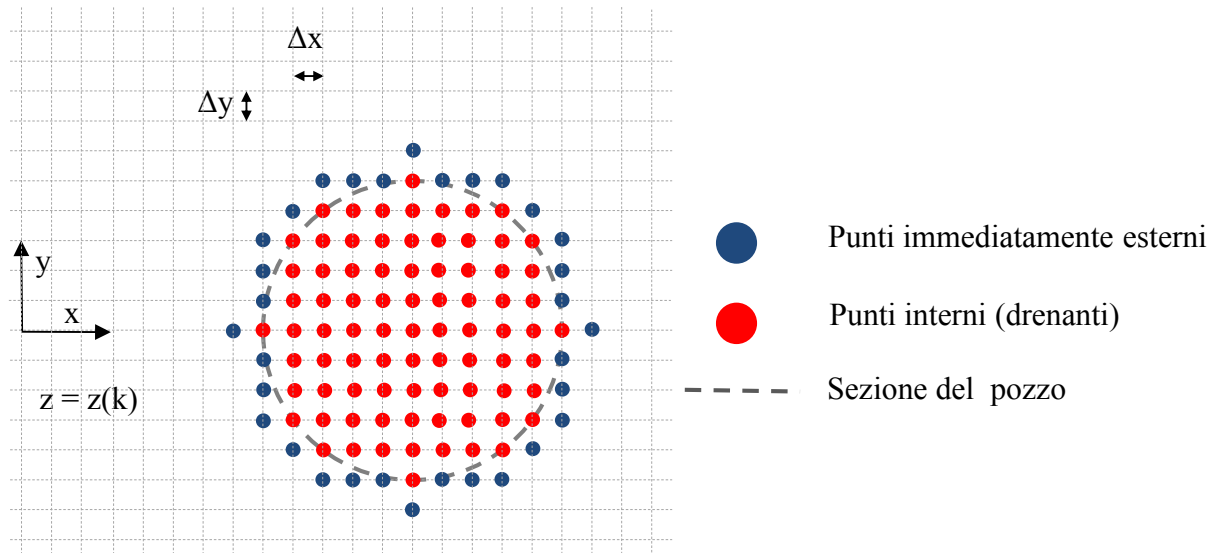


Figura 5.3: schema di riferimento per la condizione da assegnare nei punti drenanti.

Dal punto di vista della programmazione e dell’implementazione in Matlab, la procedura per attivare la condizione di “superficie di filtrazione”, di seguito descritta, è molto faticosa.

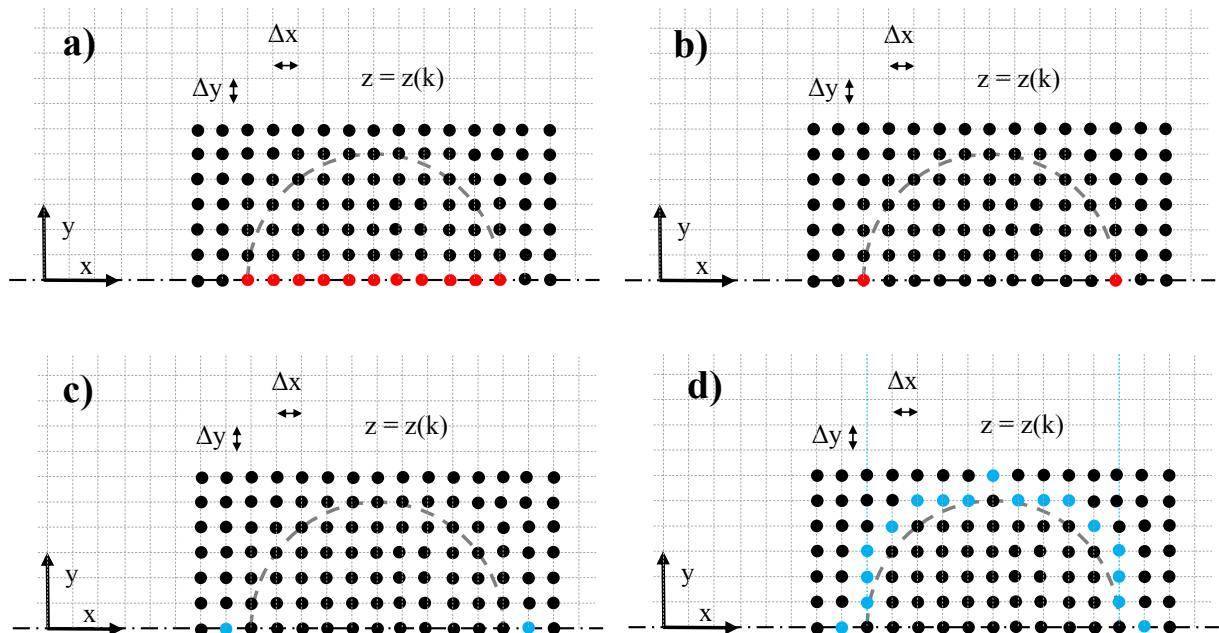
Per prima cosa, durante le operazioni preliminari di definizione dei punti drenanti (già illustrate in figura 3.20, §3.8.8), vengono aggiunte alcune righe di comando (evidenziate dai rettangoli in rosso in figura 5.4), che permettono di creare una matrice (MX_{palo}). Tale matrice contiene gli intervalli di indici dei punti (in rosso figura 5.5a) che soddisfano la seguente condizione: essi appartengono al segmento dato dalla intersezione della generica sezione drenante (per tutti i pozzi e tutti i piani x-y) con il piano di simmetria passante per l’asse dei pozzi. Da questa matrice vengono estratti, tramite *ciclo for*, solo gli indici relativi agli estremi di tali intervalli e collocati nella matrice Mx_{palo} (stringa di comando in figura 5.6; schematizzazione degli indici salvati nella matrice in figura 5.5b). In seguito con un analogo *ciclo for* si ottiene la matrice $Mx_{intornopalo}$, contenente gli indici degli estremi entro cui ricadono i punti immediatamente esterni a ciascun pozzo (punti in azzurro in figura 5.5c).

```

Mxpalo=nan(2,2*floor(n/2)+1,length((nz+1-round(npalo*cosd(a))):nz));


```

Figura 5.4: generazione della matrice ausiliaria MXPalo.


 Figura 5.5: schema delle matrici ausiliarie contenenti, per i punti evidenziati, gli indici dei punti stessi: a) matrice MXPalo; b) matrice Mxpalo; c) matrice Mxintorno; d) schema della matrice **hintornopalo** contenente tutti termini nulli ad eccezione di valori unitari sui punti evidenziati in azzurro.

L'ultima operazione della fase di inizializzazione è la creazione di una matrice **hintornopalo**, delle stesse dimensioni di **h**, che abbia tutti valori nulli, e valori unitari nei punti

immediatamente esterni ai pozzi (punti in azzurro figura 5.5d). Per ottenere tale matrice, si esegue un ciclo FDM fittizio della durata di un solo passo temporale (figura 5.7).

```

for nn=1:2*floor(n/2)+1
    for cc=(nz+1-round(npalo*cosd(a))):nz
        Mxpalo(:,nn,cc)=[min(Mxpalo(:,nn,cc)); max(Mxpalo(:,nn,cc))];
    end %estremi degli intervalli di coordinate in x coperti dai punti
end %drenanti per ogni pozzo (nn) e per ogni profondità (cc)

for nn=1:2*floor(n/2)+1
    for cc=(nz+1-round(npalo*cosd(a))):nz
        Mxintornopalo(:,nn,cc)=[min(Mxpalo(:,nn,cc))-1; max(Mxpalo(:,nn,cc))+1];
    end %estremi degli intervalli di coordinate in x coperti dai punti
end %immediatamente esterni per ogni pozzo(nn)e per ogni profondità (cc)
    
```

Figura 5.6: generazione delle matrici ausiliarie *Mxpalo* e *Mxintornopalo*.

```

g1=g==0; % valore 0 dove g~=0 valore 1 dove g=0
gg2=g~=0; % valore 1 dove g~=0 (ovvero sui punti drenanti) valore 0 dove g=0
%ciclo fittizio FDM in cui viene fatto eseguire solo 1 step, partendo da una condizione
%di h sempre nulla e pari 1 sui pozzi
%in seguito ripristinando un un valore nullo sui pozzi si otterranno gli unici punti non nulli
%nell'intorno dei pozzi stessi, in modo da ottenere una matrice che permetta
%di calcolarci la h media nell'intorno del pozzo per assegnare una superficie di filtrazione
h=h+gg2; %h ha inizialmente tutti valori nulli
    hmashpiccy=h(:,ny1,2:end-1);
    hmashgrany=h(:,ny1+2,2:end-1);
    hmashpiccx1=h(nx1+2,:,2:end-1);
    hmashgranax1=h(nx1,:,2:end-1);
    hmashpiccx2=h(nx1+nx2,:,2:end-1);
    hmashgranax2=h(nx1+nx2+2,:,2:end-1);
h(nx1+2:nx1+nx2, 2:ny1,2:end-1)=rxx2*(h(nx1+1:nx1+nx2-1,2:ny1,2:end-1)+h(nx1+3:nx1+nx2+1,2:ny1,
h(nx1+2:nx1+nx2,ny1+2:end-1,2:end-1)=rxx2*(h(nx1+1:nx1+nx2-1, ny1+2:end-1,2:end-1)+h(nx1+3:nx1+
h(2:nx1,2:ny1,2:end-1)=rxx1*(h(1:nx1-1,2:ny1,2:end-1)+h(3:nx1+1,2:ny1,2:end-1))+(1-2*rx1y1)*h(2
h(2:nx1, ny1+2:end-1, 2:end-1)=rxx1*(h(1:nx1-1, ny1+2:end-1, 2:end-1)+h(3:nx1+1, ny1+2:end-1, 2
h(nx1+nx2+2:end-1,2:ny1,2:end-1)=rxx3*(h(nx1+nx2+1:end-2,2:ny1,2:end-1)+h(nx1+nx2+3:end,2:ny1,2
h(nx1+nx2+2:end-1, ny1+2:end-1, 2:end-1)=rxx3*(h(nx1+nx2+1:end-2, ny1+2:end-1, 2:end-1)+h(nx1+n
h(nx1+1,2:ny1,2:end-1)= (1-2*(ryy1+rz))* h(nx1+1,2:ny1,2:end-1) + cv*dt*2*( hmashpiccx1(:,2:ny1
h(nx1+nx2+1,2:ny1,2:end-1)= (1-2*(ryy1+rz))* h(nx1+nx2+1,2:ny1,2:end-1) + cv*dt*2*( hmashpiccx2
h(nx1+1,ny1+2:end-1,2:end-1)= (1-2*(ryy2+rz))* h(nx1+1,ny1+2:end-1,2:end-1) + cv*dt*2*( hmashpi
h(nx1+nx2+1,ny1+2:end-1,2:end-1)= (1-2*(ryy2+rz))* h(nx1+nx2+1,ny1+2:end-1,2:end-1) + cv*dt*2*(
h(2:nx1,ny1+1,2:end-1)= (1-2*(rxx1+rz))* h(2:nx1,ny1+1,2:end-1) + cv*dt*2*( hmashpiccy(2:nx1,:
h(nx1+2:nx1+nx2,ny1+1,2:end-1)= (1-2*(rxx2+rz))* h(nx1+2:nx1+nx2,ny1+1,2:end-1) + cv*dt*2*( hma
h(nx1+nx2+2:end-1,ny1+1,2:end-1)= (1-2*(rxx3+rz))* h(nx1+nx2+2:end-1,ny1+1,2:end-1) + cv*dt*2*(
h(nx1+1,ny1+1,2:end-1)= (1-2*rz)* h(nx1+1,ny1+1,2:end-1) + cv*dt*2*( hmashpiccy(nx1+1,:,) -(1+
h(nx1+nx2+1,ny1+1,2:end-1)= (1-2*rz)* h(nx1+nx2+1,ny1+1,2:end-1) + cv*dt*2*( hmashpiccy(nx1+nx2

h=h.*g1; %ripristino lo 0 sui punti drenanti rimangono valori diversi da 0
    %solo nei punti intorno ai pozzi
hintornopalo= (h~=0); %matrice tutta nulla con 1 nei punti immediatamente
    %esterni ai pozzi
    
```

Figura 5.7:ciclo FDM fittizio per la generazione della matrice ausiliaria *hintornopalo*.

La matrice h iniziale contiene tutti termini nulli e valori unitari sui punti interni. Una volta concluso il singolo passo temporale, si assegnano valori nulli anche sugli stessi punti interni. In questo modo, avendo calcolato con l'equazione 3.6 la quota punto per punto, gli unici termini non nulli di h sono quelli che nella loro equazione presentano almeno un valore di h diverso da 0, ovvero presentano almeno un punto interno tra quelli adiacenti. Attraverso una semplice verifica, eseguita sui valori diversi da 0 della h ottenuta, si ottiene la matrice *hintornopalo*.

Una volta create, in fase preliminare, le matrici ausiliarie appena descritte, la condizione sui punti drenanti viene ripristinata dopo ogni passo di calcolo mediante le istruzioni di comando riportate in figura 5.8.

In primis viene assegnata, su tutti i pozzi e per tutto il loro sviluppo verticale, una condizione di pressione neutra nulla. Servendosi poi della matrice ausiliaria *hintornopalo* si calcola la matrice *hintornopalo_c*, che contiene i valori di h nei punti immediatamente esterni a tutti i pozzi mentre gli altri suoi termini sono nulli. In seguito tramite un doppio *ciclo for* e sfruttando le altre matrici ausiliarie, viene eseguita una serie di operazioni per tutti i piani x-y della mesh (indice “cc”) e per ogni singolo pozzo (indice “nn”): si calcolano i valori della h nei punti immediatamente esterni (sfruttando gli indici immagazzinati nella matrice *Mxintornopalo*). Al valor medio ottenuto da questi termini, viene sottratto il valore medio della quota geometrica dei punti interni. Se dal risultato di questa operazione si ottiene un termine negativo (indice di una inversione del gradiente), esso viene immagazzinato, per ognuno dei punti interni, all'interno di una matrice *gfiltr*, che contiene i valori delle correzioni da sommare ad h per ottenere la matrice finale del j-mo passo di calcolo.

```
h=h.*g1+g; %pozzi: h=zz (pressione neutra nulla)
hintornopalo_c=h.*hintornopalo; %quota h sui punti immediatamente esterni
% ai pozzi; 0 su tutti gli altri punti

for nn=1:2*floor(n/2)+1 %per ogni pozzo
    for cc=(nz+1-round(npalo*cosd(a))):nz %per ogni piano a z costante

        [xx yy vv]=find(hintornopalo_c([Mxintornopalo(1,nn,cc) :Mxintornopalo(2,nn,cc) ],:,cc));
        % cerca per ogni profondità (cc) tutti i valori (vv) di hintornopalo diversi
        % da 0 compresi tra gli indici iniziali e finali per ogni pozzo(nn)

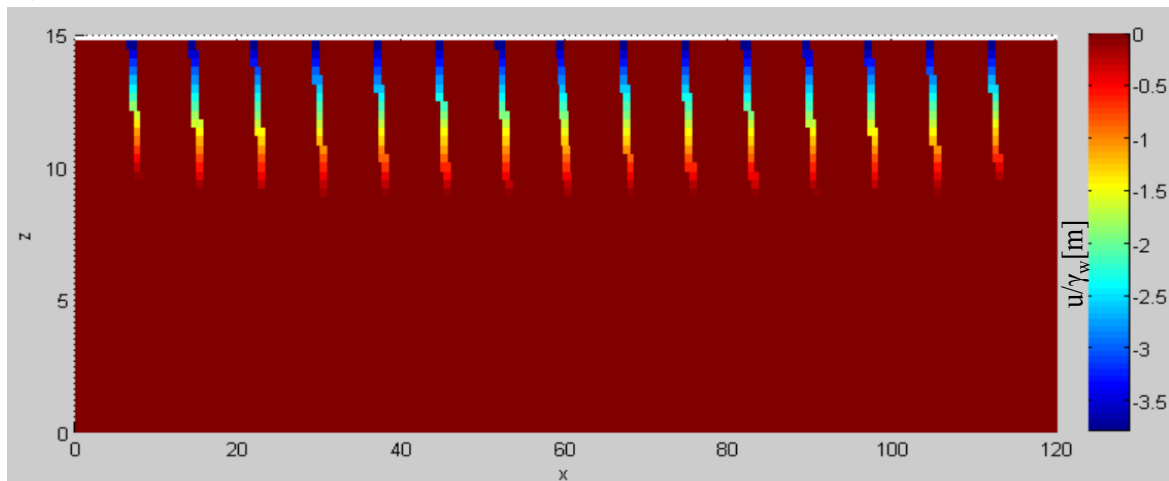
        if (mean(vv)-mean(zz(Mxintornopalo(1,nn,cc) : Mxintornopalo(2,nn,cc),1,cc))<0
            meanu=mean(vv)-mean(zz(Mxintornopalo(1,nn,cc) : Mxintornopalo(2,nn,cc),1,cc));
            % se h medio nei punti esterni (mean(vv)), è maggiore della quota geometrica (zz)
            % media dei punti drenanti calcolo tale differenza

            gfiltr(Mxpalo(1,nn,cc):Mxpalo(2,nn,cc),:,cc)=gg2(Mxpalo(1,nn,cc):Mxpalo(2,nn,cc),:,cc)*meanu;
            %gfiltr contiene solo sui punti drenanti per ogni pozzo (nn) e ogni profondità (cc) la
            %differenza meanu, su tutti gli altri punti il valore è nullo
        end
    end
end
h=h+gfiltr;
```

Figura 5.8: ripristino della condizione (superficie di filtrazione) nei punti drenanti.

In figura 5.9a viene riportata una “slice” della matrice **gfiltr** corrispondente con il piano di simmetria x-z passante per l’asse dei pozzi (piano $y=0$). In tale rappresentazione si leggono, tramite i colori in legenda, i valori delle correzioni applicate ad h alla fine di un generico passo di calcolo. Si nota facilmente che le correzioni sono ovunque nulle, mentre risultano diverse da zero, ed in particolare negative, solo nella porzione superiore dei pozzi. Sovrapponendo il grafico a quello in figura 5.9b, in cui si leggono le pressioni neutre sullo stesso piano, si nota che, con la modellazione proposta, solo la parte “immersa” dei pozzi funge da drenaggio (si possono infatti intuire dei forti gradienti in prossimità delle superfici drenanti), mentre nella zona sovrastante, dove i valori delle pressioni neutre sono negativi, non vi è alcun effetto dei pozzi sulla distribuzione di pressioni neutre. Tale comportamento è da considerare perfettamente in linea con quanto richiesto dalla modellazione per le analisi in presenza della condizione al contorno variabile.

a)



b)

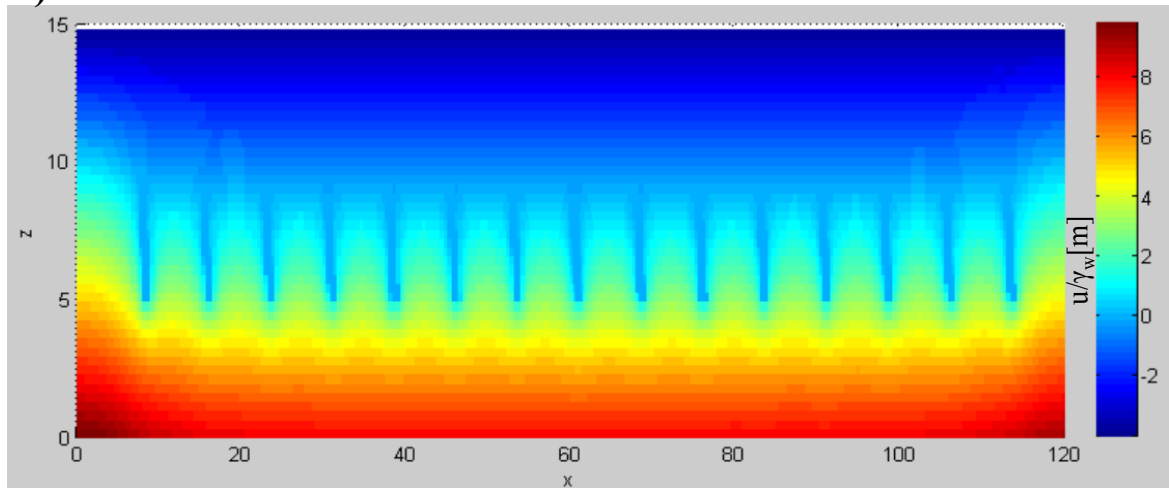


Figura 5.9: a) valori della correzione da applicare ad h al generico passo di calcolo (slice con il piano $y=0$ della matrice **gfiltr**); b) pressioni neutre alla fine del generico passo di calcolo (slice con il piano $y=0$ della matrice **u**).

5.4 Effetto del sistema drenante sulle fluttuazioni stagionali delle pressioni neutre

Una volta adeguato il modello numerico alle nuove condizioni al contorno, è stata eseguita una serie di analisi. Il numero di parametri che influenza la soluzione in questo caso è elevato. Alle già numerose variabili considerate nel caso di condizione al contorno fissa, vanno aggiunte l'ampiezza delle oscillazioni ' A ' e il coefficiente di consolidazione ' c_v '. In figura 5.10 è riportato l'andamento tipico delle altezze piezometriche medie su superfici parallele al piano campagna poste a diverse profondità D , in funzione del tempo (fattore tempo T). L'ampiezza delle oscillazioni assegnate ($A=4$ m) è deducibile dalla curva di colore blu rappresentativa della condizione al piano campagna, $D=0$. La profondità delle superfici può essere dedotta dal valore iniziale dell'altezza piezometrica, ricordando che in un pendio indefinito se la filtrazione avviene nella direzione del pendio stesso risulta: $u/\gamma_w = D \cdot \cos^2 \alpha$. Gli altri parametri adottati sono: $i=s=7,5$ m; $H_0=10$ m; $H=15$ m; $d=1$ m; $\alpha=10^\circ$; $P=1$ anno; $c_v=5 \cdot 10^{-6}$ m²/s.

I risultati ottenuti evidenziano la mutua influenza tra la risposta del sistema alla consolidazione indotta dai drenaggi, e la risposta del sistema alle fluttuazioni stagionali. In una prima fase il processo di consolidazione è dominante (ingresso in esercizio dei drenaggi): il sistema dà conto della riduzione delle pressioni neutre su tutte le superfici fino a che, ad un certo punto, si raggiunge una seconda fase in cui la pressione neutra inizia ad oscillare, con periodo P , intorno ad un valore medio stazionario. Osservando i massimi locali di ciascuna curva è possibile notare che essi non vengono attinti contemporaneamente. In altre parole i massimi valori delle pressioni neutre non sono sincroni in tutto il dominio, ma è evidente lo sfasamento temporale della risposta alla condizione al contorno. Tale ritardo cresce con la profondità in maniera men che lineare (curva tratteggiata in figura 5.10), al punto che, fra le superfici più profonde lo sfasamento è minimo o addirittura trascurabile.

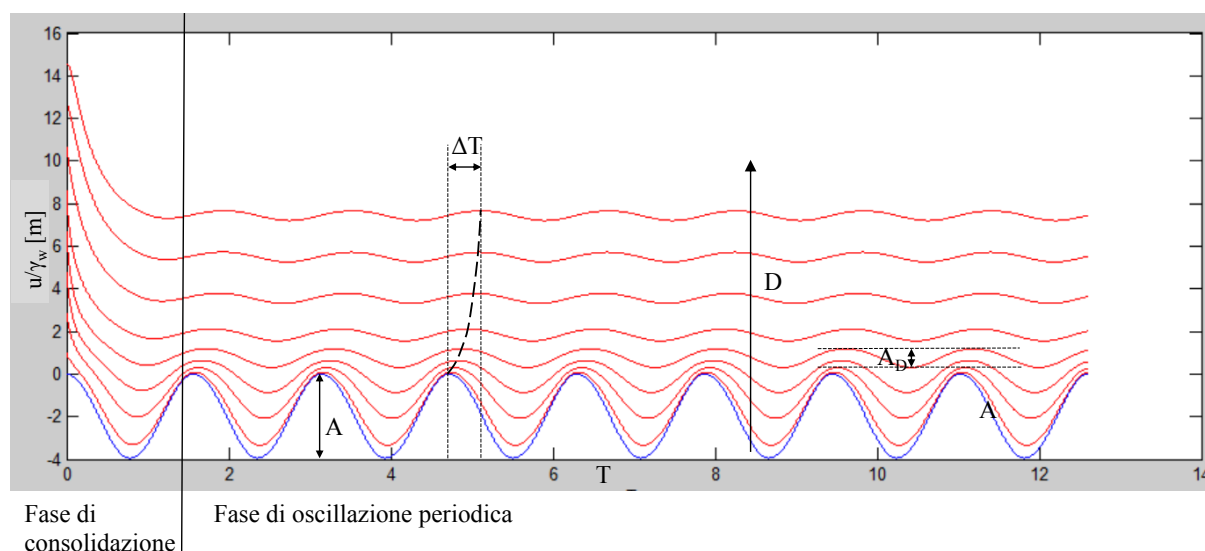


Figura 5.10: evoluzione delle pressioni neutre medie a differenti profondità.

L'aspetto più significativo dello studio è sicuramente l'effetto del sistema di pozzi drenanti sulle ampiezze delle oscillazioni. Per analizzare tale comportamento sono state effettuate alcune analisi, in modo da indagare l'effetto di diversi parametri (i cui valori sono riportati in tabella 5.1) sul funzionamento del sistema. In particolare sono stati presi in considerazione due valori dell'interasse tra i pozzi, due valori dell'ampiezza dell'oscillazione e tre valori del coefficiente di consolidazione. I risultati delle analisi sono riportati nei grafici in figura 5.11 ($i=7,5$ m, $A=2$ m, c_v = variabile), figura 5.12 ($i=12,5$ m, $A=2$ m, c_v = variabile), figura 5.13 ($i=7,5$ m, $A=4$ m, c_v = variabile), figura 5.14 ($i=12,5$ m, $A=4$ m, c_v = variabile).

Geometria								Tipo di Terreno
L	s	i	α	d	A	H_0	H	c_v
[m]	[m]	[m]	[°]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]
100	$s=i$	7,5 ; 12,5	10	1	2 ; 4	10	15	10^{-6} $5 \cdot 10^{-6}$ 10^{-5}

Tabella 5.1: valori dei parametri utilizzati nelle analisi con condizione al contorno variabile.

Le curve in ciascun grafico rappresentano gli inviluppi dei valori massimi (curve continue in rosso), minimi (curve continue in verde) e medi (curve continue in nero) delle pressioni neutre, in funzione della profondità, che si ottengono quando il sistema è entrato in esercizio. Sugli stessi grafici vengono riportati (curve tratteggiate) gli stessi inviluppi in assenza del sistema drenante.

L'effetto della condizione variabile assegnata al piano campagna è già evidente dall'osservazione degli inviluppi delle pressioni in assenza di pozzi. In particolare si nota una riduzione delle ampiezze delle oscillazioni (distanza tra gli inviluppi massimi e minimi) con la profondità. Tale effetto, detto per brevità di "laminazione", cresce al diminuire del coefficiente di consolidazione, finché, per valori molto piccoli di c_v ed elevate profondità, le ampiezze delle oscillazioni si annullano e le pressioni neutre possono essere confuse col loro valore medio. Tali valori non risentono affatto delle condizione variabile assegnata al piano campagna e coincidono esattamente con quelli che si otterrebbero considerando il pelo libero della falda a profondità costante e pari ad $A/2$.

Una volta realizzato il sistema drenante ed attinta la condizione di esercizio, le analisi con condizione al contorno variabile mostrano un ulteriore effetto benefico dei drenaggi che la soluzione con lama d'acqua a p.c. ovviamente non mostra. Infatti, oltre ad una riduzione del valore medio annuale delle pressioni neutre, i drenaggi inducono una riduzione delle oscillazioni stagionali superiore rispetto a quanto accade in condizioni naturali (cioè in assenza di pozzi). Il suddetto effetto benefico cresce ulteriormente riducendo l'interasse tra i pozzi.

Analogamente a quanto accade in assenza di drenaggi, le ampiezze delle oscillazioni si riducono sulle superfici più profonde e per coefficienti di consolidazione via via minori finché, anche in questo caso, gli involuipi si possono confondere con i valori medi delle pressioni neutre, che dipendono solamente dalla posizione media del pelo libero della falda.

Il tipo di rappresentazione scelta mette in risalto un ulteriore aspetto del comportamento del sistema di pozzi drenanti. Indipendente dalla condizione assegnata al piano campagna, l'effetto dei pozzi è davvero rilevante solo nello strato di terreno compreso tra il piano campagna e la base dei pozzi (10 m in questo caso, come evidenzia la linea tratto e punto). Infatti, in questa zona, il profilo delle pressioni neutre si discosta fortemente da quello lineare che regna in assenza di sistema drenante. In particolare, in virtù della componente di flusso verticale diretta verso il basso legata al funzionamento dei pozzi, l'andamento del profilo delle pressioni neutre con la profondità è sensibilmente meno che lineare fino alla base dei pozzi stessi.

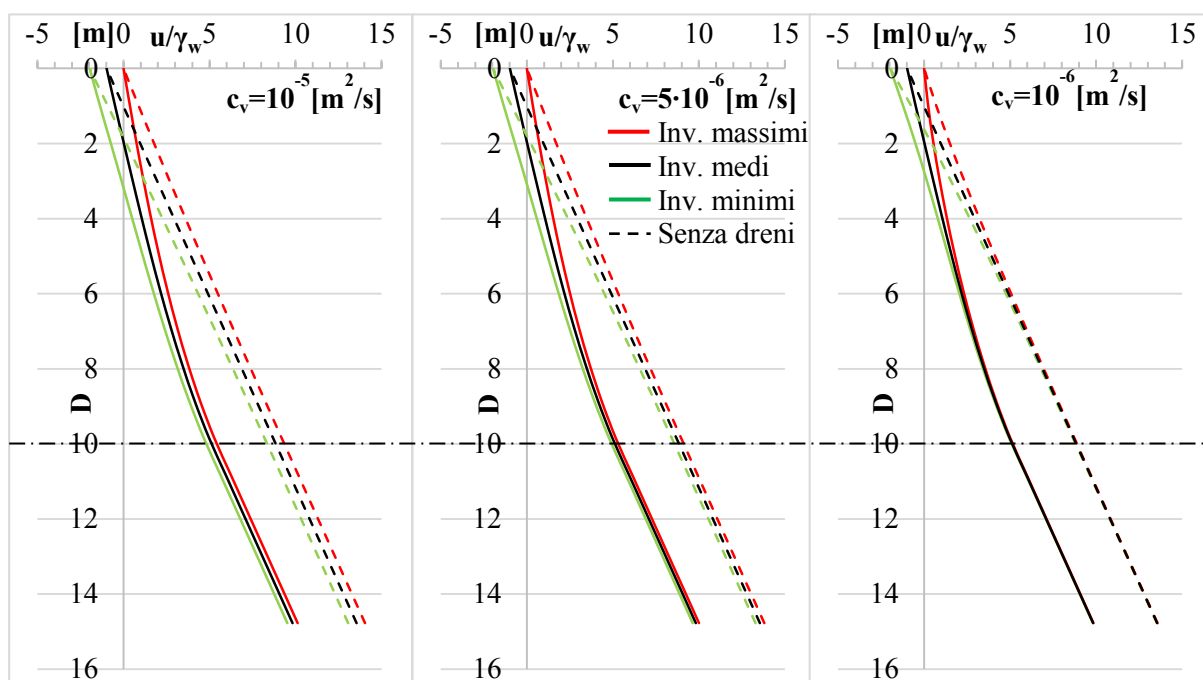


Figura 5.11: involuipi dei valori massimi, minimi e medi delle pressioni neutre in funzione della profondità in presenza di pozzi (curve continue) e in assenza di pozzi (curve tratteggiate). Parametri fissi: $A=2$ m, $H=15$ m, $H_0=10$ m, $d=1$ m, $i=s=12,5$ m, $\alpha=10^\circ$. Parametri variabili: $c_v=10^{-5}$ m²/s (grafico a sinistra), $c_v=5 \cdot 10^{-6}$ m²/s (grafico al centro), $c_v=10^{-6}$ m²/s (grafico a destra).

Appena al di sotto della profondità raggiunta dai pozzi, nella fascia di terreno compresa tra la base degli stessi e la superficie limite inferiore, l'andamento delle pressioni neutre medie diventa sub-parallelo a quello che si avrebbe in condizioni naturali, ovvero è lineare con inclinazione pari a $\cos^2 \alpha$. Tale evidenza dimostra ulteriormente che, per un funzionamento ottimale del sistema, le opere di drenaggio devono raggiungere la profondità della superficie di scorrimento o almeno essere molto prossime ad essa.

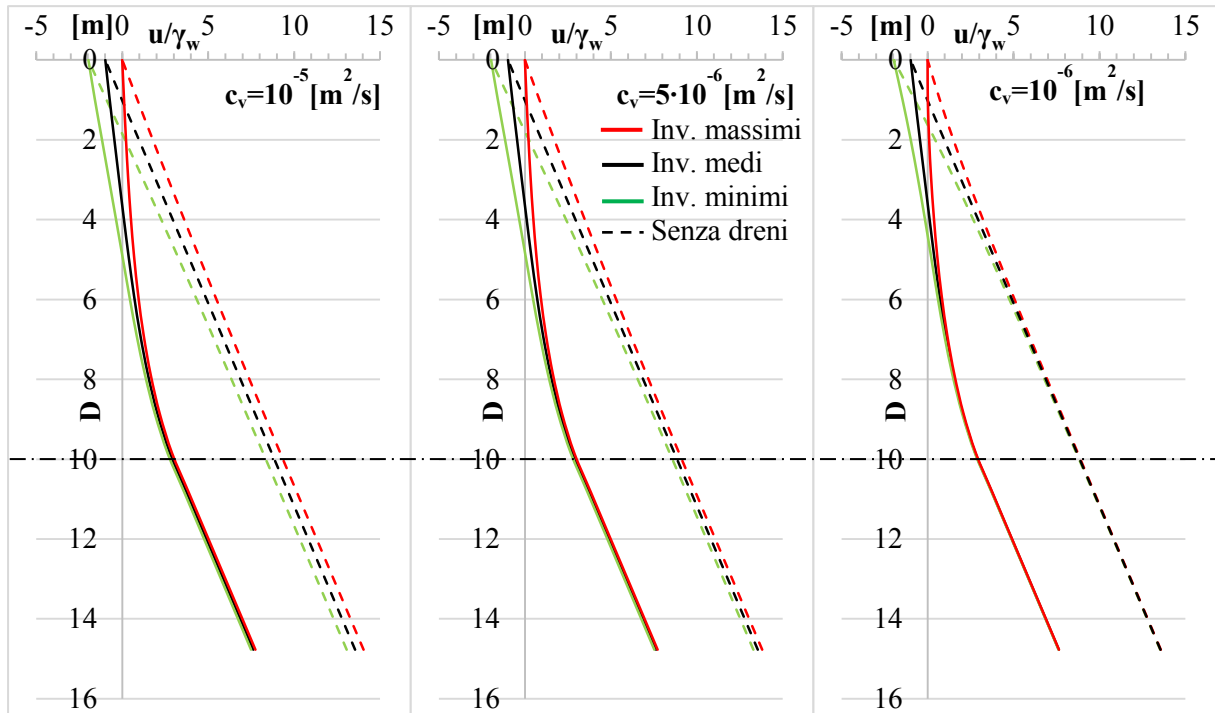


Figura 5.12: parametri fissi: $A=2 \text{ m}$, $H=15 \text{ m}$, $H_0=10 \text{ m}$, $d=1 \text{ m}$, $i=s=7,5 \text{ m}$, $\alpha=10^\circ$. Parametri variabili: $c_v=10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (grafico a sinistra), $c_v=5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (grafico al centro), $c_v=10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (grafico a destra).

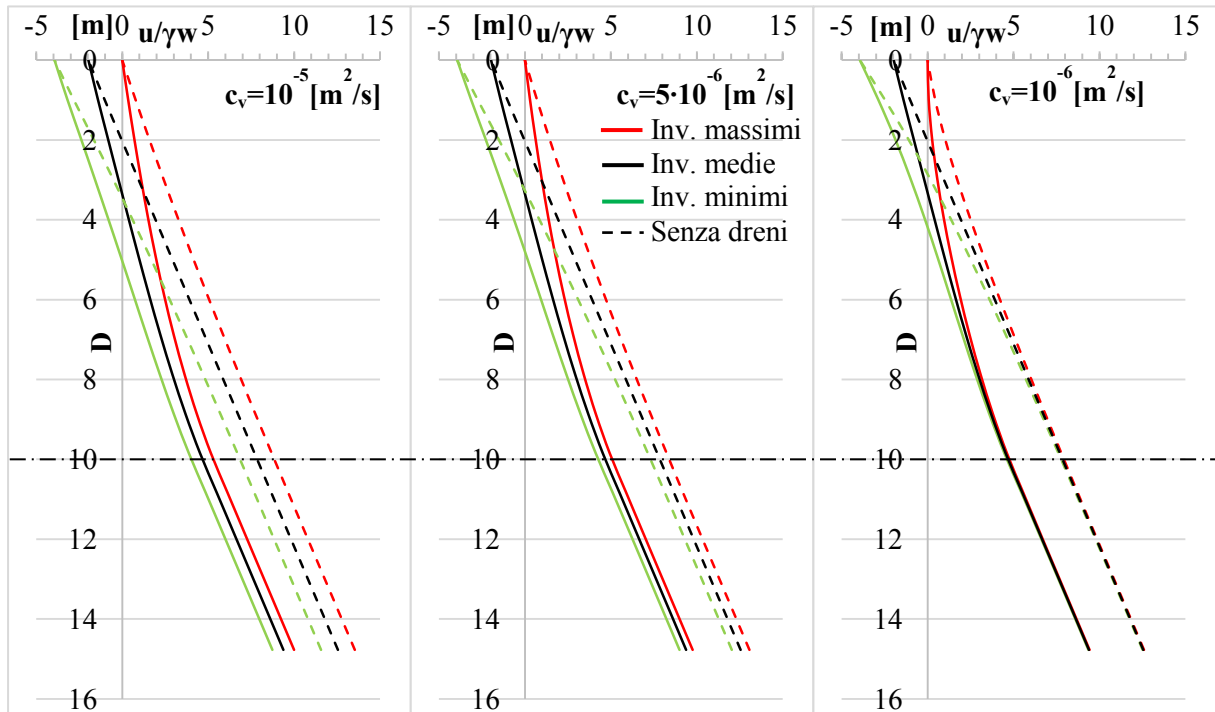


Figura 5.13 Parametri fissi: $A=4 \text{ m}$, $H=15 \text{ m}$, $H_0=10 \text{ m}$, $d=1 \text{ m}$, $i=s=12,5 \text{ m}$, $\alpha=10^\circ$. Parametri variabili: $c_v=10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (grafico a sinistra), $c_v=5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (grafico al centro), $c_v=10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (grafico a destra).

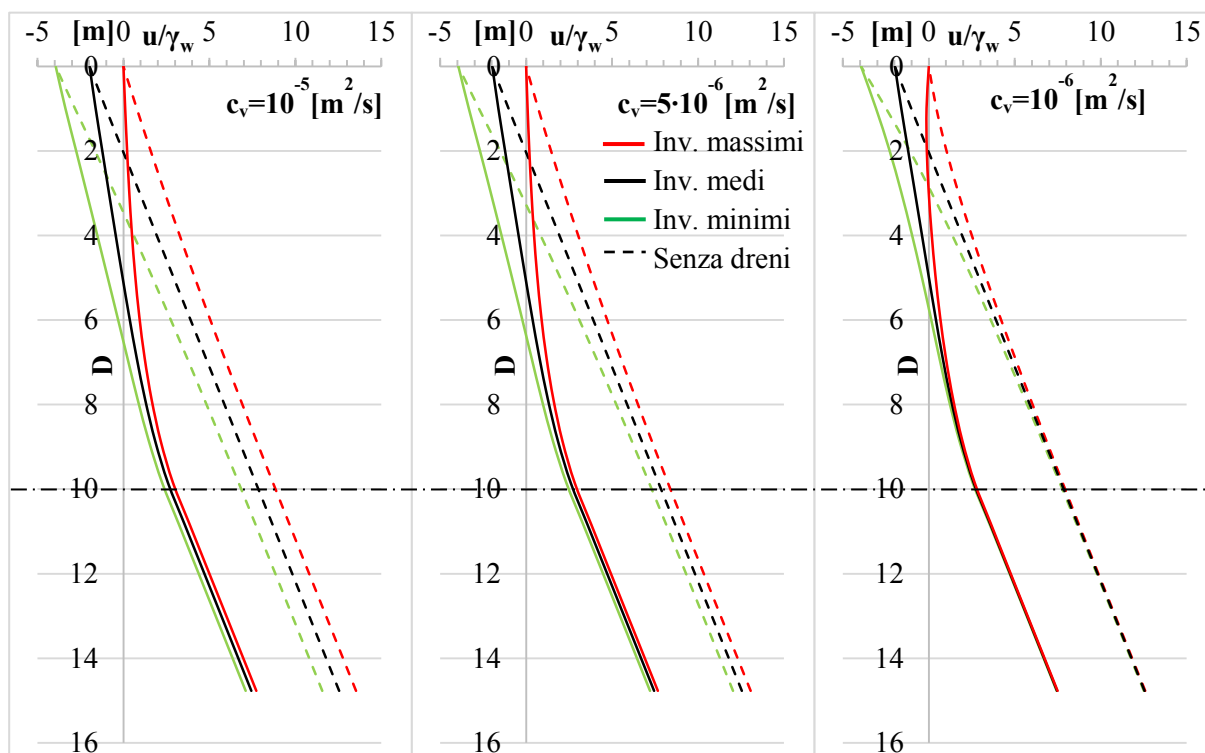


Figura 5.14: parametri fissi: $A=4$ m, $H=15$ m, $H_0=10$ m, $d=1$ m, $i=s=7,5$ m, $\alpha=10^\circ$. Parametri variabili: $c_v=10^{-5}$ m²/s (grafico a sinistra), $c_v=5 \cdot 10^{-6}$ m²/s (grafico al centro), $c_v=10^{-6}$ m²/s (grafico a destra).

5.5 Confronto tra soluzioni con condizione a p.c. variabile e lama d'acqua

In questo paragrafo è riportato il confronto tra i risultati ottenuti, a parità di tutti gli altri parametri in gioco, facendo variare soltanto la condizione assunta sul bordo superiore. In particolare sono riportati (figura 5.15a), in funzione della profondità, sia l'involuppo dei valori massimi di pressioni neutre per la condizione al contorno variabile (curva continua in rosso), sia le pressioni neutre derivanti dall'ipotesi canonica di lama d'acqua al piano campagna (curva continua in nero). Sullo stesso grafico vengono riportate (curve tratteggiate) anche le rispettive condizioni naturali (assenza di drenaggi). Il confronto è riportato (figura 5.15b) anche in termini di efficienza. I valori dei parametri utilizzati per questo confronto sono: $A=4$ m, $H=15$ m, $H_0=10$ m, $d=1$ m, $i=s=12,5$ m, $\alpha=10^\circ$, $c_v=5 \cdot 10^{-6}$ m²/s.

Analizzando l'andamento delle pressioni neutre con la profondità si nota la differenza tra le soluzioni relative ai due approcci. L'involuppo dei massimi valori, ottenuti per condizione al contorno variabile, è sempre minore della distribuzione che si ottiene in condizioni di lama d'acqua. Sulla base di questa considerazione è possibile affermare che, dal punto di vista progettuale, l'analisi con falda variabile al piano campagna è più efficace rispetto a quella canonica, basata sulla condizione di lama d'acqua al piano campagna. Essa infatti, consentendo una valutazione più accurata delle pressioni neutre, permette l'ottimizzazione del

progetto dei drenaggi, basato sull'involuppo delle massime pressioni neutre previste che rappresenta comunque un approccio sicuro.

Tale considerazione risulta ancor più valida per terreni con bassi valori del coefficiente di consolidazione, caratterizzati da un forte effetto di laminazione delle fluttuazioni con la profondità. Infatti, poiché la soluzione in condizioni di lama d'acqua non dipende da c_v , la differenza tra i due approcci aumenta quando c_v si riduce. In casi di forte effetto di laminazione, i risultati delle analisi lascerebbero addirittura pensare alla possibilità di progettare i drenaggi ipotizzando il pelo libero della falda statico, posto al livello medio annuo.

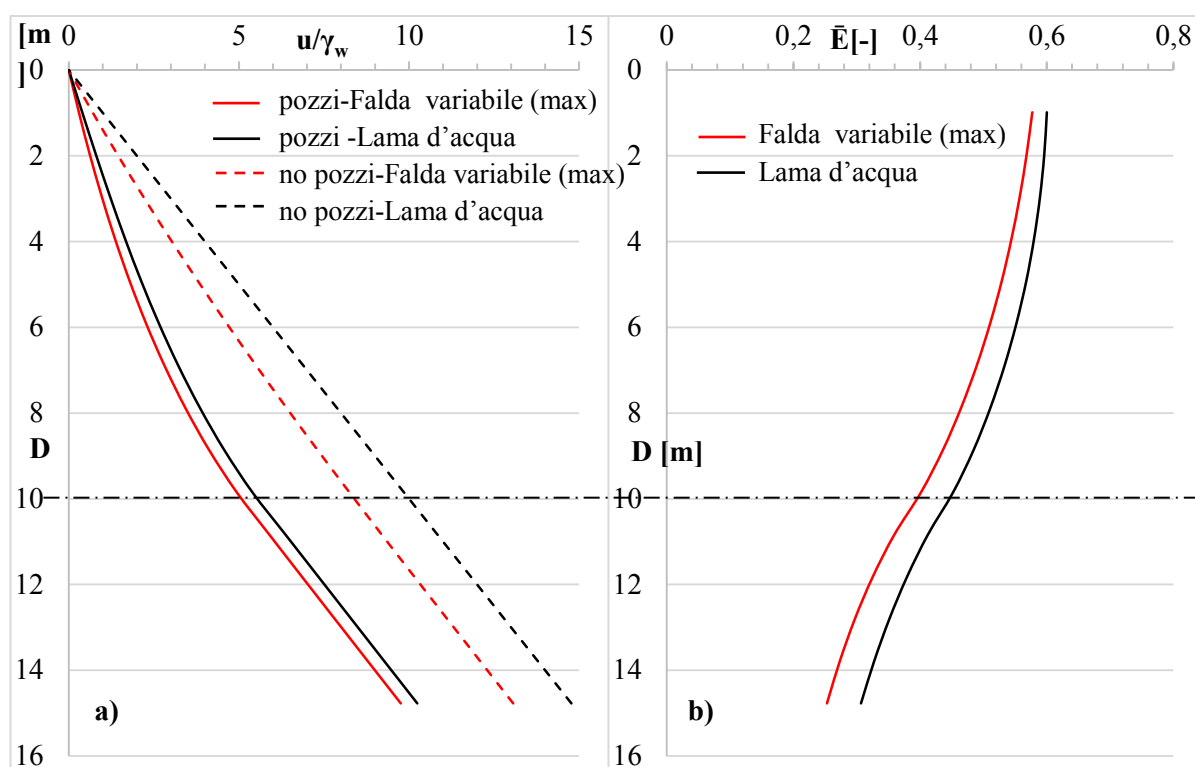


Figura 5.15: confronto tra analisi con condizione variabile e lama d'acqua al piano campagna: a) massimi valori di pressione prima e dopo l'ingresso in esercizio dei pozzi; b) efficienze idrauliche a regime.

Esaminando invece il problema in termini di efficienze valutate rispetto alle relative condizioni iniziali, si evince che le analisi in condizioni di lama d'acqua conducono sempre ad efficienze maggiori. Tale risultato evidenzia un problema associato all'utilizzo delle soluzioni adimensionali basate sulla lama d'acqua, ovvero all'utilizzo dei classici abachi. In particolare, il rischio è di sovrastimare l'efficienza dell'opera, se essa non viene associata ad un'appropriata condizione iniziale. Infatti, è prassi abbastanza comune utilizzare gli abachi con riferimento alle pressioni neutre iniziali che si ottengono dal monitoraggio in sito, alla profondità della superficie di scorrimento. Tali valori, come si evince da analisi più realistiche

in presenza di condizione al contorno variabile, conducono ad una pericolosa sottostima delle pressioni neutre in esercizio.

Come già analizzato al §2.6, l'utilizzo degli abachi deve essere sempre basato sulla condizione iniziale utilizzata nelle analisi e non sulle misurazioni effettuate in sito (cioè deve essere usata come pressione neutra iniziale sulla superficie di scorrimento quella che deriva dalla condizione al bordo ipotizzata). Lo studio proposto in questo paragrafo mostra, in più, che nemmeno rifacendosi ai massimi valori di pressioni neutre, misurati in sito prima della realizzazione dell'opera, si sconfigge il pericolo di sottostimare le pressioni neutre nella condizione di esercizio dei drenaggi.

6 IL SOFTWARE drenando

6.1 Introduzione

I risultati sin qui illustrati hanno mostrato che il comportamento del sistema di pozzi è influenzato da un elevato numero di parametri. L'utilizzo degli abachi, prodotti in ipotesi di lama d'acqua al piano campagna, permette di dimensionare un sistema schematico e non può tenere conto di tutte le variabili in gioco. Inoltre, gli sviluppi proposti nel precedente capitolo lasciano intendere la possibilità di un'ulteriore ottimizzazione nella progettazione dei sistemi drenanti, a patto di introdurre ulteriori parametri (nella fattispecie A , c_v). Per un pieno raggiungimento dell'obiettivo iniziale, che si ricorda essere quello di fornire degli strumenti semplici per la progettazione e l'ottimizzazione del sistema di pozzi, è essenziale tenere conto anche di questi ultimi sviluppi. Da un punto di vista pratico, tuttavia, un approccio di tipo parametrico risulterebbe notevolmente complesso. Nondimeno una rappresentazione dei risultati sotto forma di abachi risulterebbe poco "semplice" da utilizzare, mancando uno degli obiettivi preposti.

Questi aspetti, uniti alla considerazione di voler sfruttare il lavoro di modellazione e programmazione già effettuato, hanno convinto lo scrivente a compiere un ulteriore passo e ad ampliare gli obbiettivi iniziali verso la realizzazione di uno strumento di validità più generale. Tutti gli sforzi sono stati concentrati sulla realizzazione di un'interfaccia grafica per il codice e alla creazione di un programma eseguibile e distribuibile: il software DreNando.

La modellazione inclusa nel codice è stata ampliata ed estesa anche al caso di altre geometrie. Oltre al sistema di pozzi a "rete" il software permette di simulare il processo di consolidazione nel caso di un pozzo singolo, oppure di altre tecnologie come trincee o sistemi di aste, parallele o disposte a raggiera. Il software permette, attraverso un totale di 73 *script* di comando, di calcolare ed esportare le pressioni neutre su qualsiasi superficie appartenente al dominio tridimensionale. Una serie di elaborazioni rende possibile una diversa visualizzazione degli output: dalle pressioni su una superficie assegnata ad uno spaccato tridimensionale del dominio. Per il caso dei pozzi è stata integrata la possibilità di ottenere gli inviluppi di pressione, in presenza di fluttuazioni assegnate, come già illustrato nel capitolo precedente. Infine, in tutti i casi, può essere visualizzata ed esportata l'evoluzione delle pressioni neutre nel tempo.

In questo capitolo, viene riportata una sorta di piccolo manuale per l'utilizzo del software. Per prima cosa sono riportati i requisiti minimi hardware richiesti e le istruzioni per l'installazione del programma. In seguito vengono descritte ed illustrate le diverse schermate di input ed output, per le differenti sezioni relative a ciascuna tecnologia. Nell'illustrare il funzionamento del software, per aiutarne la comprensione, verranno forniti alcuni cenni di teoria.

6.2 Presentazione del software

Il software DreNando viene distribuito come file archivio compresso nominato DreNando.zip, delle dimensioni di circa 360 MB. Scompattando il file si ottiene una cartella al cui interno sono contenuti 3 file. Il file DreNando.exe, il file MCRinstaller.exe., il file Readme.txt.

DreNando.exe è un applicazione eseguibile, precompilata in linguaggio Matlab. Per eseguire il file è necessario aver installato sul proprio computer una versione di Matlab2012 o superiore. Qualora non di disponga di Matlab, il programma può essere comunque eseguito, installando Matlab Compiler Runtime. Per installare il compiler basta eseguire il file MCRinstaller.exe con i permessi di amministratore e seguire le istruzioni (figura 6.1).

Qualora non fosse disponibile tale file, lo si può scaricare gratuitamente dal sito ufficiale di Matlab all' indirizzo: <http://www.mathworks.com/products/compiler/>.

Nel file readme.txt sono illustrati i requisiti minimi e le istruzioni per l'installazione del MCRinstaller, e per l'esecuzione di DreNando.exe che di seguito vengono riportate:

- Processore a 64 bit (x64) da 1,5 GHz o superiore;
- Memoria RAM 2 GB;
- 1 GB di spazio disponibile su disco rigido;
- Sistema operativo Windows 7 o superiore;
- Display con risoluzione minima di 1024 x 768 pixel;

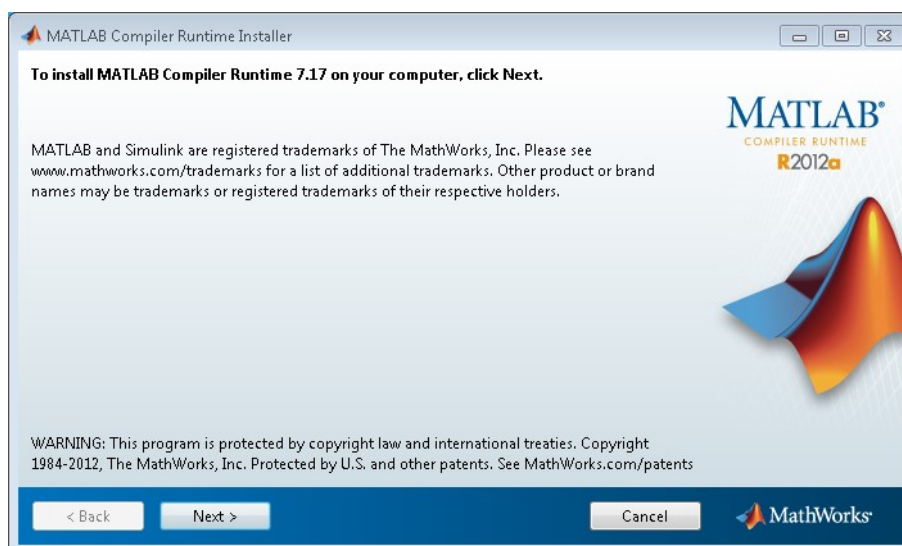


Figura 6.1: schermata di installazione del Matlab Compiler Runtime.

Una volta lanciato il software si apre la schermata iniziale (figura 6.2) da cui è possibile scegliere, cliccando sul relativo tasto, la tipologia di intervento che si vuole analizzare.

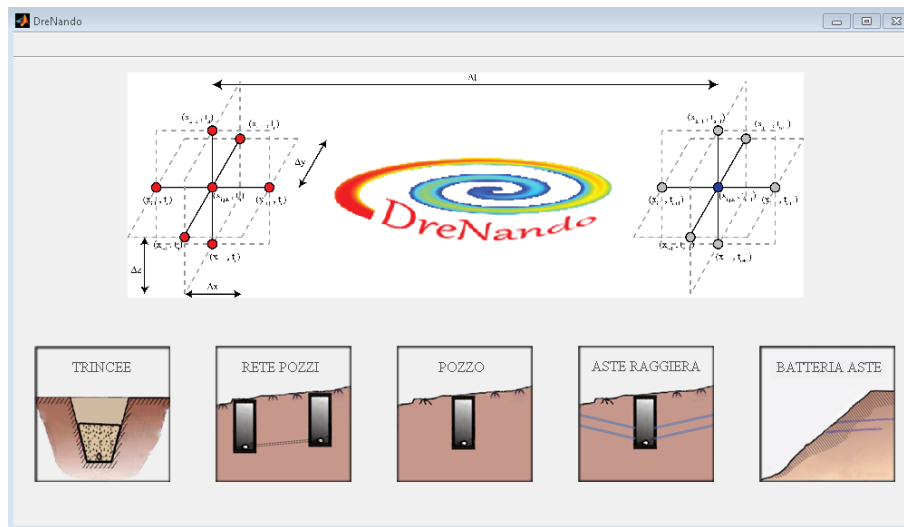


Figura 6.2: schermata iniziale del software DreNando.

6.3 Input

Tutte le schermate di input, presenti nel software DreNando, presentano una configurazione ben precisa per consentire all'utente finale un approccio molto intuitivo. Sulla sinistra vanno inseriti i parametri richiesti per il calcolo del sistema scelto. Sulla destra viene riportato lo schema geometrico per la tecnologia scelta, da cui è possibile comprendere il significato dei singoli parametri. L'area evidenziata in giallo, nelle sezioni in pianta, indica l'elemento rappresentativo del dominio a cui viene ridotta l'analisi. Inoltre sullo stesso schema viene riportato il sistema di riferimento adottato nella fase di visualizzazione degli output. Sono infine presenti due tasti: il tasto "calcola" che permette di lanciare l'analisi, ed il tasto "reset" che permette di ritornare alla schermata iniziale del software.

Nella fase di calcolo, per tutti i casi analizzati, il piano campagna viene ipotizzato orizzontale, la superficie limite inferiore è impermeabile, mentre la condizione iniziale è idrostatica con falda al piano campagna (lama d'acqua) tranne per il caso della rete di pozzi.

6.3.1 Trincee

In questa sezione viene analizzato il comportamento del sistema di trincee. I parametri di input da definire per l'analisi sono:

- Profondità della superficie di scorrimento D ;
- Profondità raggiunta dalle trincee $H0$;
- Interasse tra le trincee s ;
- Profondità del substrato impermeabile H ;
- Coefficiente di consolidazione c_v ;
- Durata dell'analisi t ;

La schermata di input per le trincee drenanti è illustrata in figura 6.3.

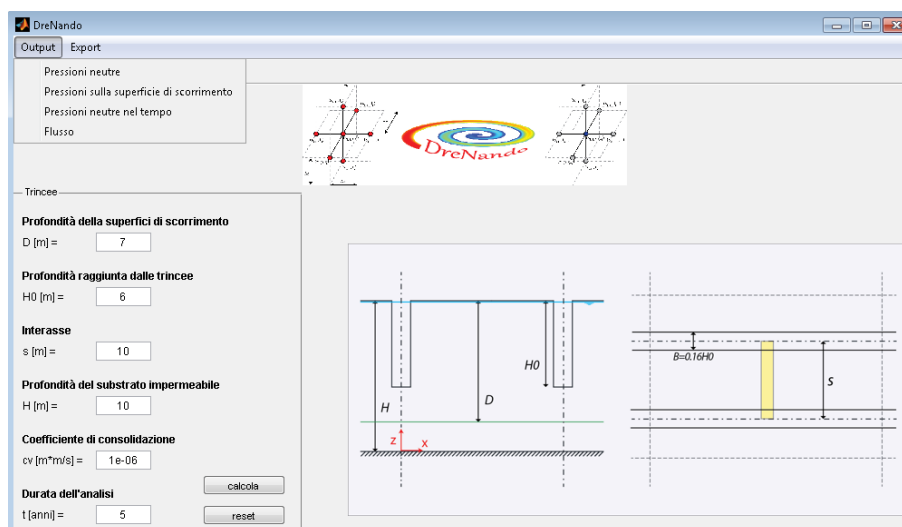


Figura 6.3: schermata di input per le trincee drenanti.

6.3.2 Rete di pozzi

La sezione relativa al sistema drenante formato da una rete di pozzi rappresenta il cuore del software, ovvero quello per il quale esso è stato originariamente concepito. Questo caso, a differenza degli altri, è l'unico che permette di simulare il comportamento del sistema in presenza di oscillazioni della falda, consentendo una analisi più realistica del funzionamento dell'opera.

I parametri di input da definire nel caso del sistema costituito da una rete di pozzi drenanti sono:

- Profondità della superficie di scorrimento D ;
- Profondità raggiunta dai pozzi H_0 ;
- Interasse tra i pozzi in direzione x s ;
- Interasse tra i pozzi in direzione y i ;
- Diametro del pozzo d ;
- Profondità del substrato impermeabile H ;
- Coefficiente di consolidazione c_v ;
- Durata dell'analisi t ;
- Ampiezza di oscillazione della falda D_w ;
- Profondità media del livello di falda Z_w ;

La schermata di input è illustrata in figura 6.4. Come già introdotto, tra i parametri da inserire nel modello non è presente l'angolo di inclinazione del pendio. Infatti le analisi vengono effettuate considerando una inclinazione nulla (si veda il § 4.2 per gli effetti dell'inclinazione

sull'efficienza del sistema). Ciò permette una notevole riduzione del volume tridimensionale da analizzare, grazie alla possibilità di considerare opportuni piani di simmetria. In questo modo si ottiene una riduzione dei tempi di calcolo che, in generale, dipendono dalle dimensioni del dominio e dalla durata scelta per l'analisi.

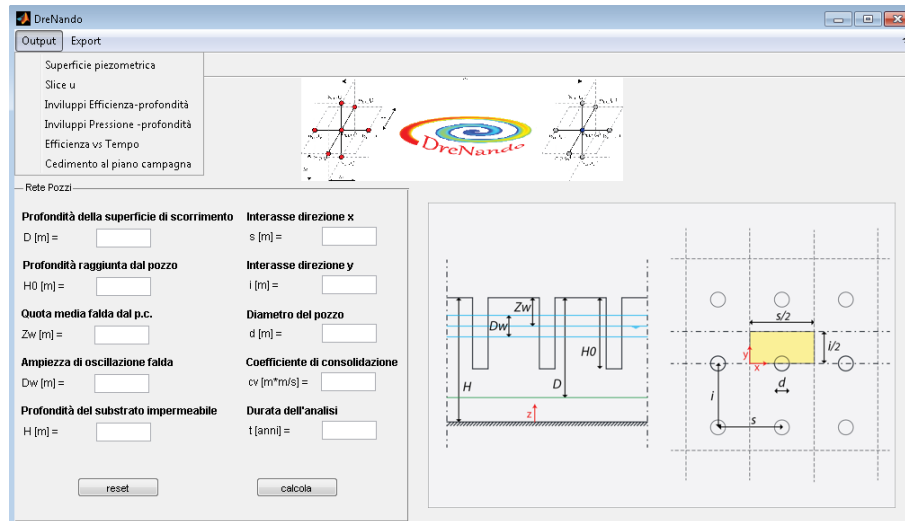


Figura 6.4: schermata di input per il sistema a rete di pozzi.

6.3.3 Pozzo singolo

La sezione dedicata al pozzo singolo è stata introdotta per analizzare l'efficienza di un pozzo isolato su una generica superficie, le cui dimensioni possono essere scelte nella fase di post-elaborazione. La geometria è molto simile al caso del sistema a rete. Tuttavia, in questo caso, si suppone che ad una certa distanza dal pozzo la quota piezometrica ritorni pari a quella preesistente $h=h_0$.

I parametri di input da definire nel caso del sistema costituito da un pozzo singolo sono:

- Profondità della superficie di scorrimento D ;
- Profondità raggiunta dal pozzo H_0 ;
- Profondità del substrato impermeabile H ;
- Semidimensione del dominio s ;
- Diametro del pozzo d ;
- Coefficiente di consolidazione c_v ;
- Durata dell'analisi t ;

La schermata di input è illustrata in figura 6.5. Si noti che la semidimensione del dominio s è uguale nella direzione x e nella direzione y . Affinché la condizione “indisturbata”, assegnata sui bordi laterali, non influenzi la soluzione nell'intorno dei pozzi, il valore di s deve essere posto pari ad almeno 2-3 volte la profondità raggiunta dal pozzo H_0 .

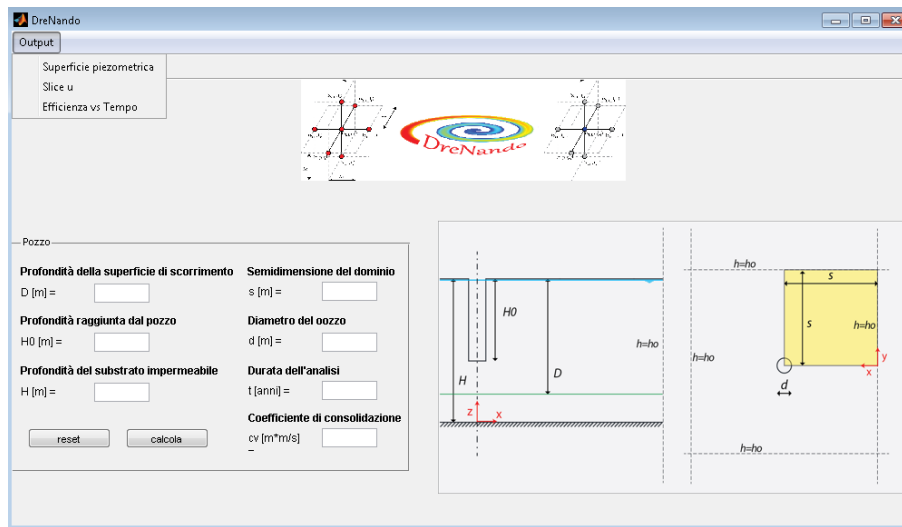


Figura 6.5: schermata di input per il pozzo isolato.

6.3.4 Aste a raggiera

Questa sezione del software permette di analizzare il comportamento di un sistema di aste, disposte in direzione radiale, a partire dalla superficie esterna di un pozzo, che non viene preso in considerazione nel calcolo (cioè perché solitamente tali pozzi hanno funzione strutturale, e la loro superficie laterale è impermeabilizzata). Le aste sono disposte su due livelli. La distanza tra due aste contigue viene implementata nel software considerando l'angolo θ che si forma al vertice tra i loro prolungamenti, così come illustrato nell'apposito schema.

I parametri di input da definire nel caso del sistema costituito da aste disposte a raggiera sono:

- Profondità della superficie di scorrimento D ;
- Profondità della prima batteria di aste $H1$;
- Profondità della seconda batteria di aste $H2$;
- Inclinazione delle aste β ;
- Distanza angolare tra le aste θ ;
- Profondità del substrato impermeabile H ;
- Semidimensione del dominio s ;
- Diametro delle aste Da ;
- Diametro del pozzo Dp ;
- Lunghezza delle aste L ;
- Coefficiente di consolidazione cv ;
- Durata dell'analisi t ;

La schermata di input per il sistema di aste a raggiera è illustrata in figura 6.6.

Qualora si volesse considerare un solo livello di aste, in luogo dei due previsti dal programma, basta inserire lo stesso valore per $H1$ ed $H2$. Poiché, anche in questo caso, si si assume una condizione indisturbata $h=h_0$, bisogna porre attenzione al valore che si assegna alla semidimensione del dominio s . In particolare si consiglia di adottare valori di s pari ad almeno 2 volte la lunghezza delle aste L . Infine, si noti che il caso delle aste a raggiera è quello che presenta la maggior richiesta di risorse, sia dal punto di vista della potenza di calcolo richiesta, sia dei tempi necessari per concludere le analisi. Durante la fase di calcolo può accadere che la finestra del programma non risponda (figura 6.7). In tal caso si sconsiglia di chiudere la finestra, in quanto il calcolo non si ferma, e la finestra si sblocca appena conclusa l'analisi. Per accelerare le operazioni di calcolo, ed evitare possibili blocchi è preferibile chiudere tutte le altre applicazioni aperte sul PC prima di eseguire l'analisi.

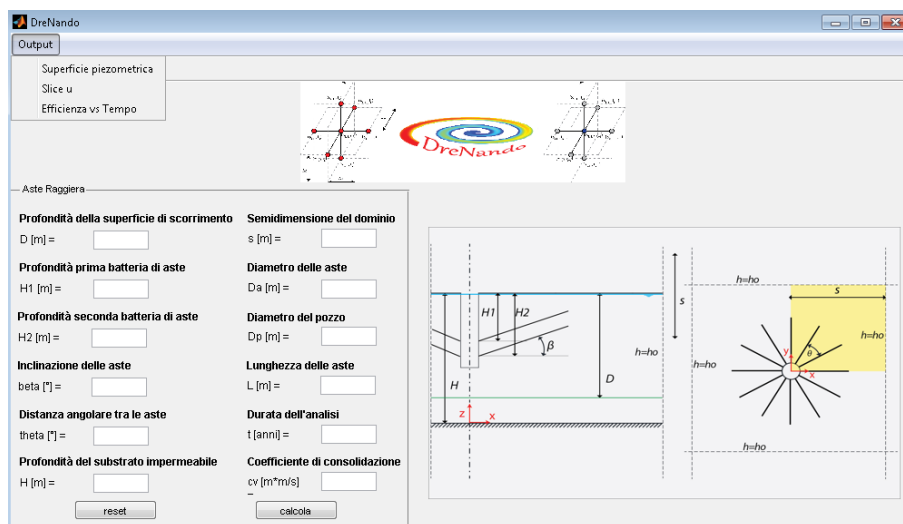


Figura 6.6 schermata di input per il sistema di aste a raggiera.

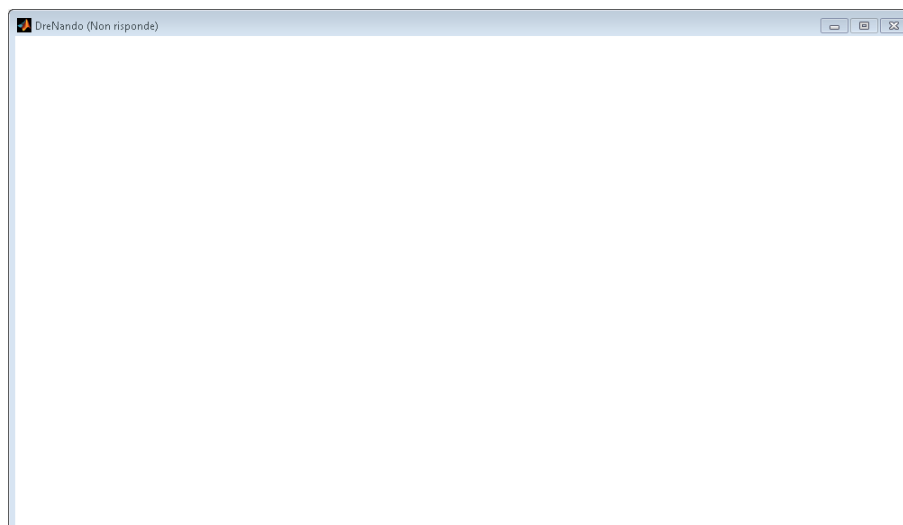


Figura 6.7: esempio di apparente blocco del software.

6.3.5 Batteria di aste

L'ultima sezione del software è dedicata alla analisi del comportamento di un sistema di aste parallele, realizzate da una parete verticale impermeabile. Le batterie sono disposte su due livelli a profondità differenti. Tra i due livelli di aste può essere scelta una differente disposizione. In particolare spuntando, dal riquadro in basso, la cella "aste sfalsate", la seconda batteria di aste viene sfalsata orizzontalmente, rispetto alla prima, di una quantità pari a $s/2$. Scegliendo la disposizione "aste parallele", le aste al livello inferiore vengono disposte, alla profondità scelta, sulla stessa verticale di quelle al livello superiore. In ultimo, si ipotizza che ad una distanza, automaticamente posta pari a $3,5L$, la quota piezometrica assuma i valori preesistenti all'istallazione dell'opera $h=h_0$.

La schermata di input per il sistema di aste parallele è illustrata in figura 6.6.

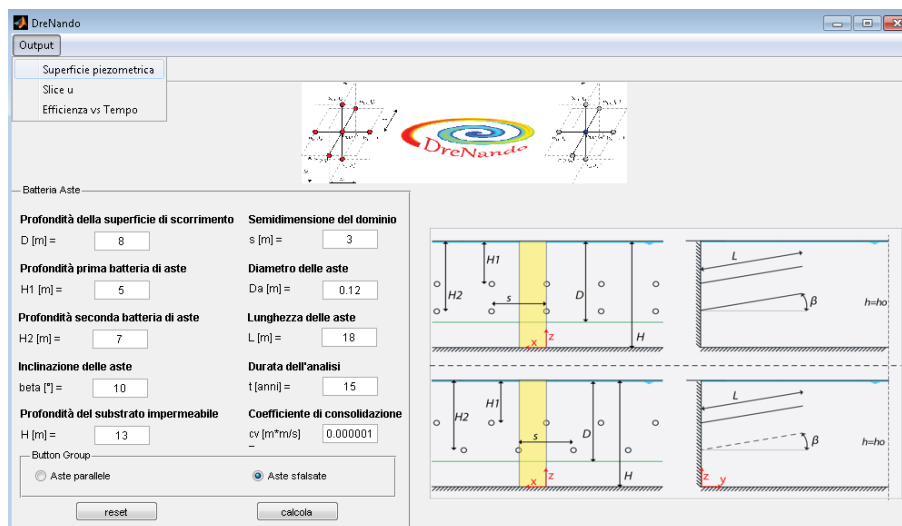


Figura 6.8: schermata di input per il sistema di aste parallele.

6.4 Output

DreNando consente una ampia scelta di rappresentazione dei risultati che si ottengono a conclusione delle analisi. Alcune delle funzioni di output, in particolare la visualizzazione tridimensionale delle pressioni neutre su una assegnata superficie (superficie piezometrica) e uno spaccato del dominio delle pressioni neutre (slice u), sono disponibili per tutte le tecnologie. La loro descrizione viene, per completezza di esposizione, ripetuta per ogni sezione. Altre funzioni, come l'evoluzione dell'efficienza nel tempo, presentano lo stesso tipo di rappresentazione ma differenti parametri di input. Altre ancora sono specifiche per alcune tecnologie. Di seguito vengono riportate, per ciascuna tecnologia, tutte le elaborazioni che il software consente di eseguire nella fase di post-processing.

6.4.1 Trincee

A differenza delle altre tecnologie, gli output disponibili per il caso delle trincee drenanti sono leggermente differenti. Ciò dipende dal fatto che gli script necessari all'analisi delle trincee sono stati realizzati separatamente a tutti gli altri e solo in seguito si è deciso di implementarli all'interno del software. Inoltre questo è l'unico caso in cui si considera uno schema bidimensionale ed il calcolo risulta praticamente immediato, consentendo di variare i parametri di input in maniera simultanea con la visualizzazione degli output. Cliccando sul tasto output dal menù a tendina sono disponibili 4 differenti opzioni (come riportato nella figura 6.3): pressioni neutre, pressioni neutre sulla superficie di scorrimento, pressioni neutre nel tempo, flusso.

6.4.1.1 Pressioni neutre

La funzione “*pressioni neutre*” consente di visualizzare la distribuzione delle pressioni neutre sulla porzione di dominio compresa tra le facce interne delle trincee. Il valore delle pressioni neutre può essere ricavato dalla apposita legenda dei colori (figura 6.9).

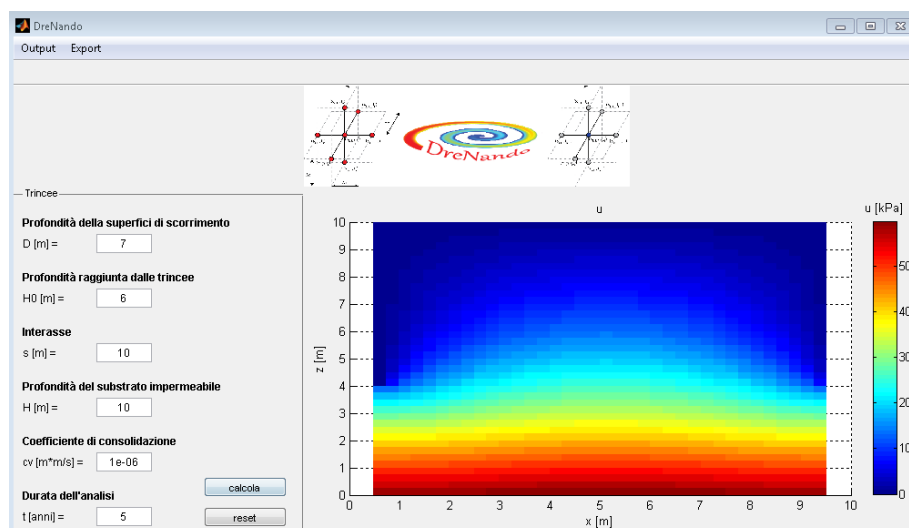


Figura 6.9: esempio di output “*pressioni neutre*” per le trincee drenanti.

6.4.1.2 Pressioni neutre sulla superficie di scorrimento

Cliccando sulla funzione “*pressioni neutre sulla superficie di scorrimento*”, si ottengono gli andamenti delle pressioni neutre, alla profondità scelta in fase di input, come riportate nell'esempio in figura 6.10. In particolare vengono riportati gli andamenti delle pressioni neutre prima e dopo la realizzazione delle trincee, nonché il valor medio. Nella zona superiore del grafico vengono riportati due valori dell'efficienza: efficienza *inter-trincea* ed efficienza *interasse*. La prima è valutata sul segmento compreso tra le due facce interne delle trincee. la seconda è valutata sul segmento compreso tra l'asse delle due trincee. In quest'ultimo caso,

per profondità delle superfici di scorrimento minori di quella raggiunta dalle trincee, viene considerata una pressione neutra nulla sulla porzione di segmento interno alla trincea.

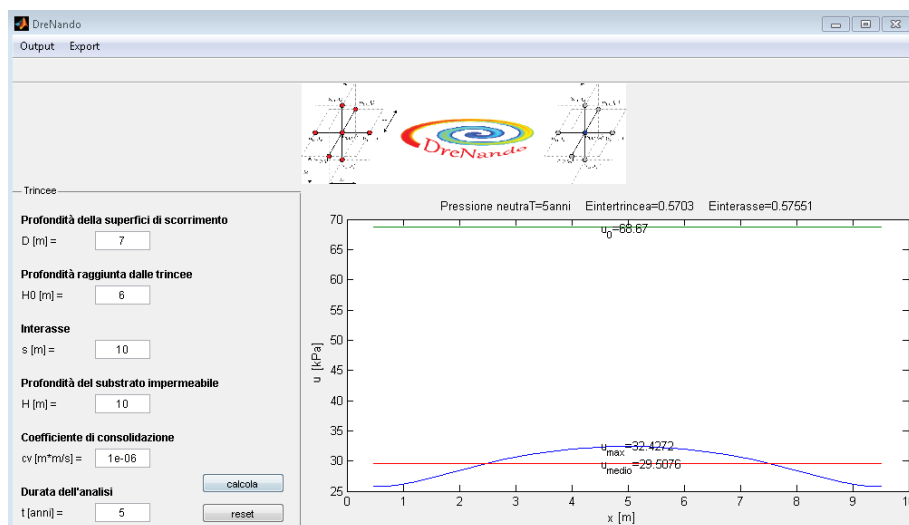


Figura 6.10: esempio di output “pressioni neutre sulla superficie di scorrimento” per le trincee drenanti.

Selezionando dal menù a tendina “export” → “ u vs x ”, è possibile visualizzare i valori tabellati delle pressioni neutre sulla superficie di scorrimento (figura 6.11). Gli stessi dati possono essere esportati sia in formato .xls che in formato .txt, cliccando sugli appositi tasti.

The screenshot shows the 'TABELLA DATI' (Data Table) window. It contains a table with the following data:

	x	u iniziale	u	u medio
1	0.4800	68.6700	25.7786	29.5076
2	0.7311	68.6700	25.7786	29.5076
3	0.9822	68.6700	26.0503	29.5076
4	1.2333	68.6700	26.5207	29.5076
5	1.4844	68.6700	27.1064	29.5076
6	1.7356	68.6700	27.7419	29.5076
7	1.9867	68.6700	28.3833	29.5076
8	2.2378	68.6700	29.0032	29.5076
9	2.4889	68.6700	29.5855	29.5076
10	2.7400	68.6700	30.1206	29.5076
11	2.9911	68.6700	30.6034	29.5076
12	3.2422	68.6700	31.0310	29.5076
13	3.4933	68.6700	31.4019	29.5076
14	3.7444	68.6700	31.7157	29.5076
15	3.9956	68.6700	31.9722	29.5076
16	4.2467	68.6700	32.1715	29.5076
17	4.4978	68.6700	32.3136	29.5076

At the bottom of the window are buttons for 'Esporta Excel', 'Esporta Txt', and 'Chiudi'.

Figura 6.11: Tabella dei dati relativi alle pressioni neutre sulla superficie di scorrimento.

6.4.1.3 Pressioni neutre nel tempo

La funzione “pressioni neutre nel tempo” (figura 6.12) permette di visualizzare l’evoluzione delle pressioni neutre medie, sulla superficie di scorrimento scelta in fase di input, in funzione del tempo. Sullo stesso grafico vengono riportati i valori del t_{50} e t_{90} , rispettivamente necessari al raggiungimento del 50% e del 90% dell’efficienza che si ottiene al termine dell’analisi.

Selezionando dal menù a tendina “*export*” → “*u vs t*”, è possibile visualizzare i valori tabellati delle pressioni neutre nel tempo (figura 6.13). Gli stessi dati possono essere esportati sia in formato .xls che in formato .txt, cliccando sugli appositi tasti.

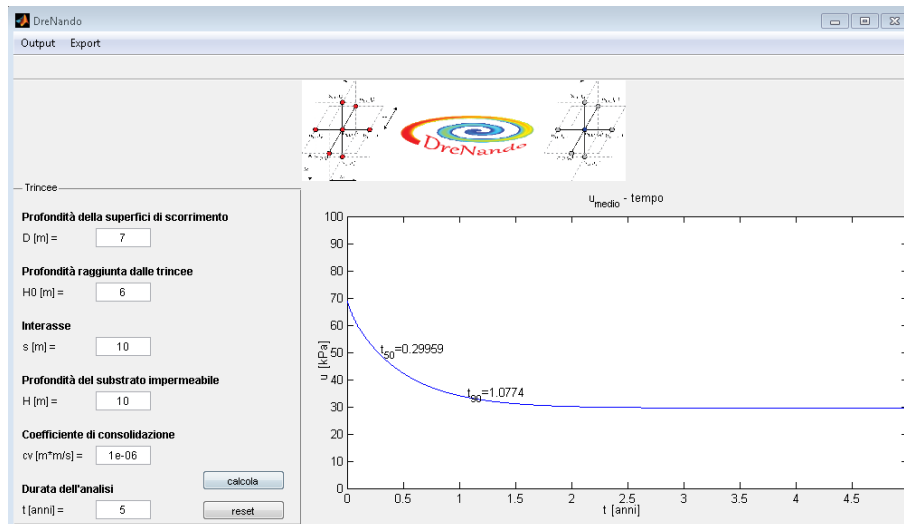


Figura 6.12: esempio di output “pressioni neutre nel tempo” per le trincee drenanti.

TABELLA DATI

DATI NUMERICI

	t [anni]	u[kPa]
1	0	68.6700
2	4.9766e-04	68.6700
3	9.9532e-04	68.6700
4	0.0015	68.6700
5	0.0020	68.6700
6	0.0025	68.6700
7	0.0030	68.6637
8	0.0035	68.6520
9	0.0040	68.6320
10	0.0045	68.6066
11	0.0050	68.5741
12	0.0055	68.5375
13	0.0060	68.4953
14	0.0065	68.4502
15	0.0070	68.4009
16	0.0075	68.3496
17	0.0080	68.2951

Esporta Excel Esporta Txt Chiudi

Figura 6.13: Tabella dei dati relativi all’evoluzione delle pressioni neutre nel tempo.

6.4.1.4 Flusso

La funzione “*flusso*” restituisce una rappresentazione del processo di filtrazione che si instaura al termine dell’analisi (figura 6.14). Sul grafico vengono riportati i vettori velocità di flusso e i contorni di quota piezometrica.

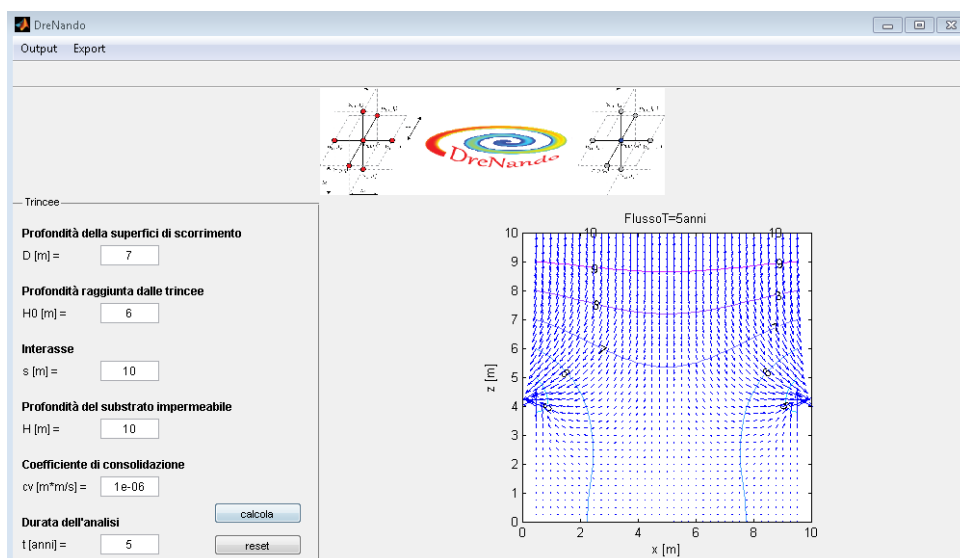


Figura 6.14: esempio di output “flusso” per le trincee drenanti.

6.4.2 Rete di pozzi

La sezione dedicata al sistema di drenaggio formato da una rete di pozzi è, come già anticipato, quella che rappresenta il cuore del software DreNando. Per questa tecnologia sono attualmente disponibili 6 funzioni di output: superficie piezometrica, slice u , involuppi pressione-profondità, involuppi efficienza-profondità, efficienza vs tempo, cedimenti al piano campagna.

6.4.2.1 Superficie piezometrica

La funzione “superficie piezometrica” consente di ottenere una visualizzazione tridimensionale delle pressioni neutre che si ottengono su una assegnata superficie parallela al piano campagna. In figura 6.15 viene riportato un esempio della schermata che si ottiene. L’unico dato di input che si richiede è la profondità D della superficie considerata dal piano campagna. Le impostazioni di azimuth e di elevazione possono essere modificate a piacimento per ottenere una rotazione tridimensionale del grafico. Una volta definiti i parametri, il tasto *plot* genera il grafico. Per ottenere i dati in formato tabellare è possibile cliccare sulla tasto *export*. Dalla schermata che si apre (figura 6.16) è possibile, inoltre, esportare gli stessi dati in formato *.xls* e *.txt*. Tramite questa funzione, modificando volta per volta il parametro D , si può ottenere il valore numerico della pressione neutra in ogni punto in cui viene discretizzato il dominio.

In ultimo, il tasto *indietro* permette di ritornare alla schermata di input per il sistema a rete di pozzi. Si noti che i salvataggi delle analisi non vengono cancellati finché non si torna alla schermata iniziale del software. Pertanto, da qualsiasi schermata di output, è possibile tornare alla schermata di input per consultare la geometria ed il sistema di riferimento, per una corretta interpretazione dei risultati.

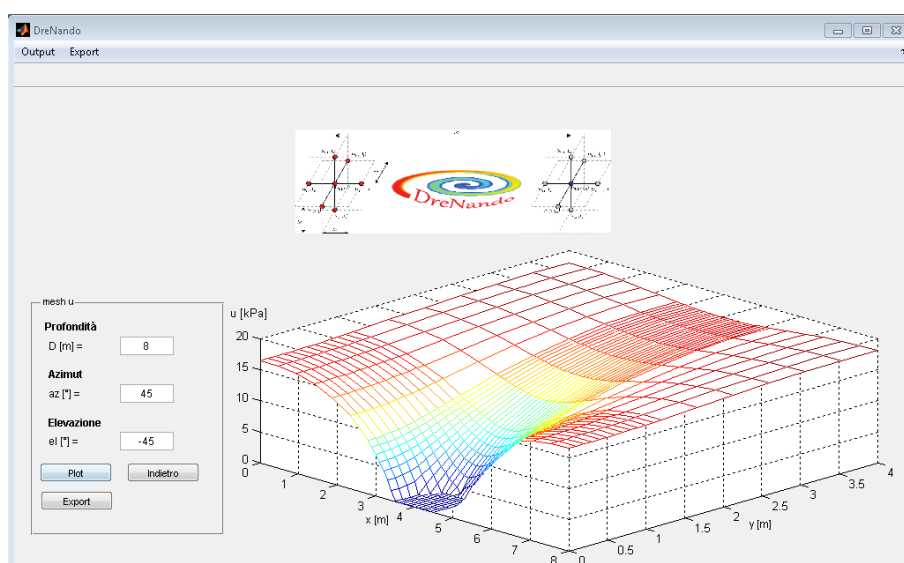


Figura 6.15: esempio di output “superficie piezometrica” per la rete di pozzi drenanti.

	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
3	6.7188	6.7188	6.8141	7.0027	7.2781	7.6273
3.1	5.6313	5.6313	5.7443	5.9709	6.3064	6.7305
3.2	4.4228	4.4228	4.5523	4.8218	5.2368	5.7600
3.3	3.0782	3.0782	3.2137	3.5201	4.0514	4.7120
3.4	1.5933	1.5933	1.6995	1.9883	2.7307	3.5905
3.5	0	0	0	0	1.2886	2.4216
3.6	0	0	0	0	0	1.2634
3.7	0	0	0	0	0	0
3.8	0	0	0	0	0	0
3.9	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
4.1	0	0	0	0	0	0
4.2	0	0	0	0	0	0
4.3	0	0	0	0	0	0
4.4	0	0	0	0	0	1.2634

Figura 6.16: Tabella dei dati relativi alle pressioni neutre sulla superficie di scorrimento.

6.4.2.2 Slice u

La funzione “slice u” consente di ottenere uno spaccato tridimensionale del dominio delle pressioni neutre e di leggerne i relativi valori facendo riferimento all’apposita legenda dei colori. In figura 6.17 è riportato un esempio della rappresentazione fornita da tale funzione. Gli unici dati di input richiesti sono le coordinate x, y e z dei piani che sezionano il dominio. Azimut ed elevazione consentono inoltre una rotazione dell’immagine a 360°.

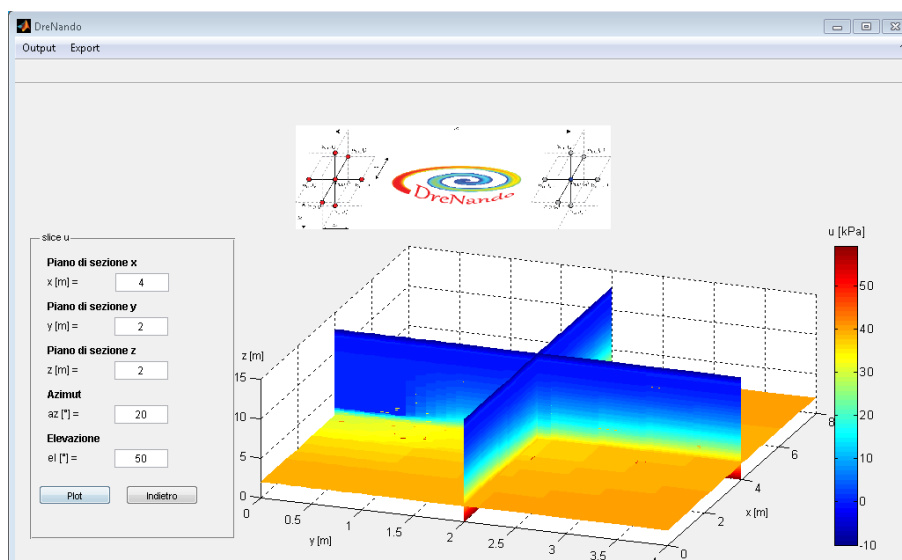


Figura 6.17: esempio di output “slice u” per la rete di pozzi drenanti.

6.4.2.3 Involuppi pressione-profondità

La funzione “involuppi pressione-profondità” consente di ottenere gli involuppi dei valori massimi, minimi e medi delle pressioni neutre in funzione della profondità (figura 6.18). Quando, in fase di input, viene impostata una quota media del livello di falda dal piano campagna Z_w diversa da 0, si ottiene una discontinuità delle curve per valori di z corrispondenti a tale quota. Inoltre gli involuppi che si ottengono al di sopra di tale livello non vanno tenuti in considerazione. Questo comportamento è dovuto ad una riduzione del numero di dati salvati nella zona, posta al di sopra del livello medio della falda, di spessore Z_w .

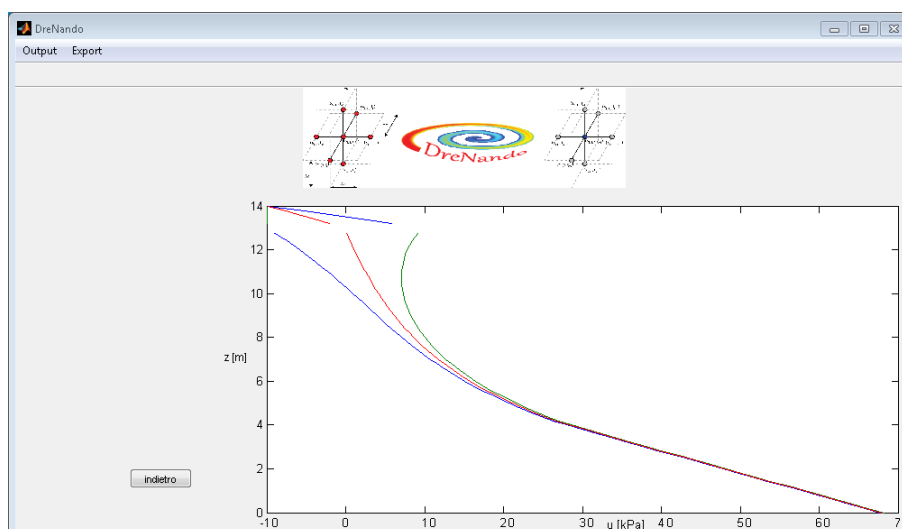


Figura 6.18: esempio di output “involuppi pressione-profondità” per la rete di pozzi drenanti.

6.4.2.4 Involuppi efficienza-profondità

La funzione “*involuppi efficienza-profondità*” consente di ottenere gli involuppi dei valori massimi, minimi e medi delle efficienze in funzione della profondità (figura 6.19). Quando, in fase di input, viene impostata una quota media del livello di falda dal piano campagna Z_w diversa da 0, si ottiene una discontinuità dei dati per valori di z corrispondenti a tale quota. Ciò è dovuto al fatto che la pressioni neutre iniziali, cui si riferisce per il calcolo dell’efficienza, sono calcolate considerando una condizione idrostatica con falda al livello Z_w . In prossimità di tale quota, le pressioni di riferimento tendono a 0, mentre i valori di pressioni durante le analisi assumono valori finiti, che dipendono dall’ampiezza assunta per le oscillazioni. Ciò conduce, nel calcolo delle efficienze, ai valori divergenti che si leggono sul grafico.

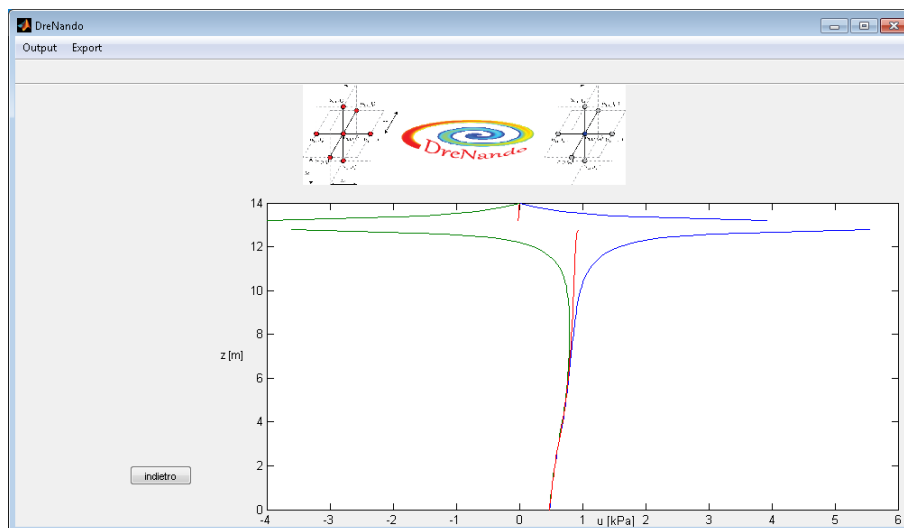


Figura 6.19: esempio di output “*involuppi efficienza-profondità*” per la rete di pozzi drenanti.

6.4.2.5 Efficienza vs tempo

La funzione “*efficienza vs tempo*” permette di visualizzare l’evoluzione dell’efficienza media, in funzione del tempo, scegliendo la profondità della superficie considerata (figura 6.20). Per ottenere i dati del grafico in formato tabellare è possibile cliccare sulla tasto *export*. Dalla schermata che si apre (analoga a quella ottenuta per le pressioni neutre nel caso delle trincee in figura 6.13) è possibile esportare gli stessi dati sia in formato *.xls* che *.txt*.

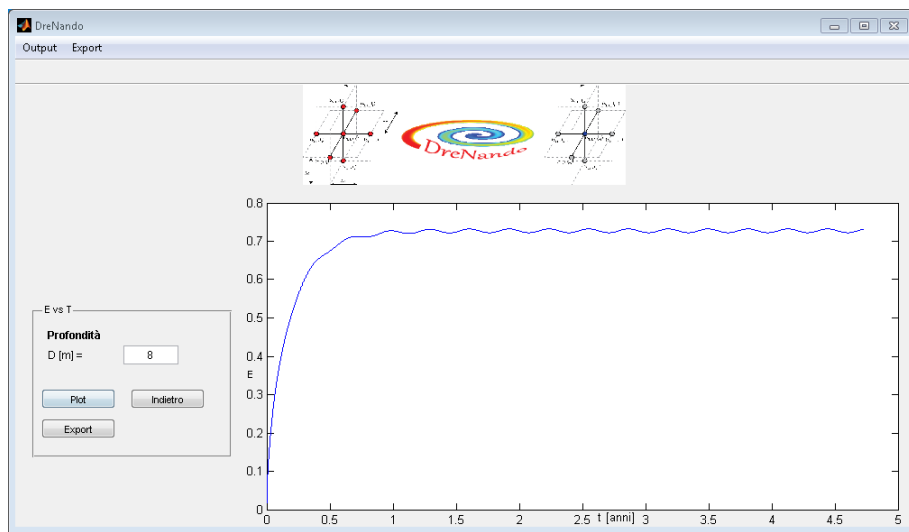


Figura 6.20: esempio di output “efficienza vs tempo” per la rete di pozzi drenanti.

6.4.2.6 Cedimenti al piano campagna

La funzione “cedimenti al piano campagna” permette di visualizzare la deformata finale del piano campagna, che accompagna il processo di consolidazione indotto dalle opere di drenaggio. (figura 6.21).

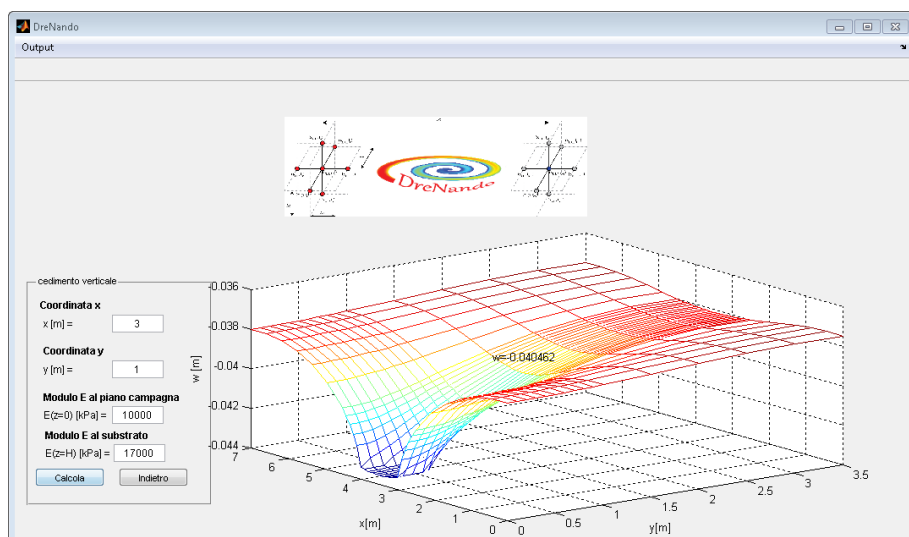


Figura 6.21: esempio di output “cedimenti al piano campagna” per la rete di pozzi drenanti.

Per ogni singola verticale, il cedimento totale è calcolato sommando i cedimenti che si ottengono per ogni livello della mesh, applicando teoria dell’elasticità:

$$w = \sum_{i=1}^{nz} \frac{\Delta\sigma'_{vi}}{Eed_i} \Delta z_i$$

Dove:

w = cedimento verticale totale

$\Delta\sigma'_v = -\Delta u'_v$ = incremento di tensione efficace verticale = riduzione di pressione neutra

Eed = modulo di rigidezza edometrica

Nel calcolo si ipotizza che la deformazione sia monodimensionale, funzione della sola componente verticale delle tensioni, che il modulo di elasticità vari linearmente con la profondità e che la superficie limite inferiore del dominio sia infinitamente rigida.

I parametri di input richiesti sono gli estremi dell'intervallo di variazione del modulo E al piano campagna e alla profondità del substrato rigido. Inoltre specificando le coordinate x e y di una generica verticale, sul grafico, viene riportato il valore del cedimento, per la stessa verticale, in corrispondenza del piano campagna.

6.4.3 Pozzo singolo

La sezione dedicata al sistema formato da un pozzo drenante isolato prevede 3 funzioni di output: superficie piezometrica, slice u , efficienza vs tempo.

6.4.3.1 Superficie piezometrica

La funzione “*superficie piezometrica*” consente di ottenere una visualizzazione tridimensionale delle pressioni neutre che si ottengono su una assegnata superficie parallela al piano campagna. In figura 6.22 viene riportato un esempio della schermata che si ottiene.

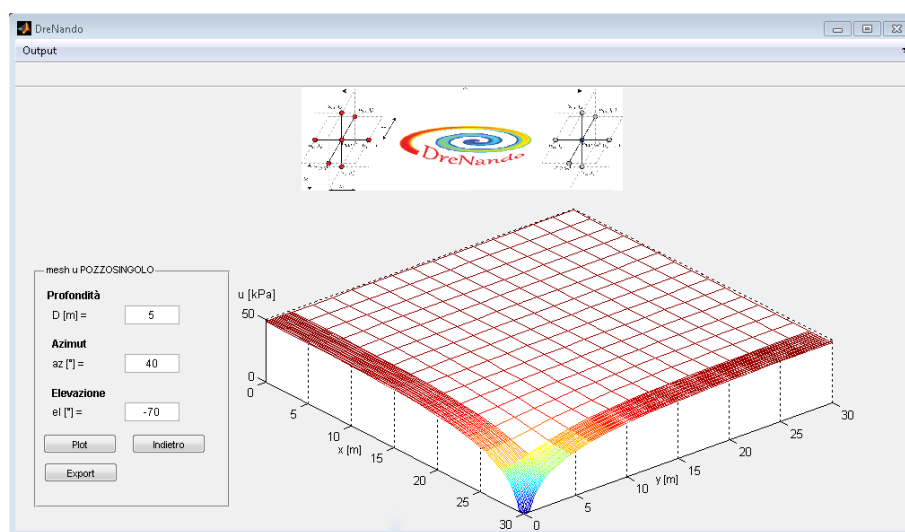


Figura 6.22: esempio di output “*superficie piezometrica*” per il pozzo isolato.

L'unico dato di input che si richiede è la profondità D della superficie considerata dal piano campagna. Le impostazioni di azimuth e di elevazione possono essere modificate a piacimento per ottenere una rotazione tridimensionale del grafico. Una volta definiti i parametri, il tasto *plot* genera il grafico. Per ottenere i dati in formato tabellare è possibile cliccare sulla tasto *export*. Dalla schermata che si apre è possibile, inoltre, esportare gli stessi dati in formato *.xls* e *.txt*. Tramite questa funzione, modificando volta per volta il parametro D , si può ottenere il valore numerico della pressione neutra in ogni punto in cui viene discretizzato il dominio.

6.4.3.2 Slice u

La funzione “*slice u*” consente di ottenere uno spaccato tridimensionale del dominio delle pressioni neutre e di leggerne i relativi valori facendo riferimento all'apposita legenda dei colori. In figura 6.23 è riportato un esempio della rappresentazione fornita da tale funzione. Gli unici dati di input richiesti sono le coordinate x , y e z dei piani che sezionano il dominio. Azimut ed elevazione consentono inoltre una rotazione dell'immagine a 360° .

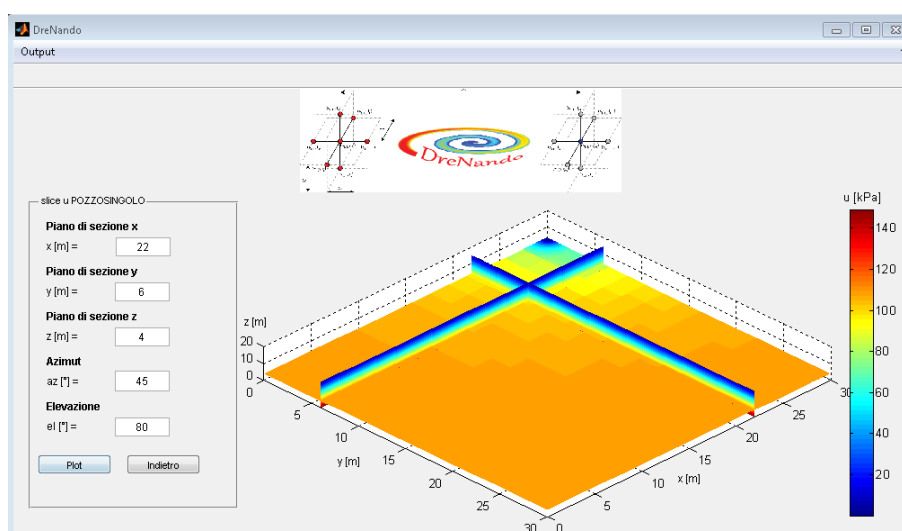


Figura 6.23: esempio di output “*slice u*” per il pozzo isolato.

6.4.3.3 Efficienza vs tempo

La funzione “*efficienza vs tempo*” permette di visualizzare l'evoluzione dell'efficienza media, in funzione del tempo, scegliendo la profondità e l'area della superficie sulla quale viene calcolata (figura 6.24). L'area è considerata rettangolare ed il pozzo viene ipotizzato al suo centro, mentre le dimensioni dei suoi due lati possono essere assegnate attraverso parametri “ l_x ” ed “ l_y ”. Per ottenere i dati del grafico in formato tabellare è possibile cliccare sulla tasto *export*. Dalla schermata che si apre (analogica a quella in figura 6.13) è possibile esportare gli stessi dati sia in formato *.xls* che *.txt*.

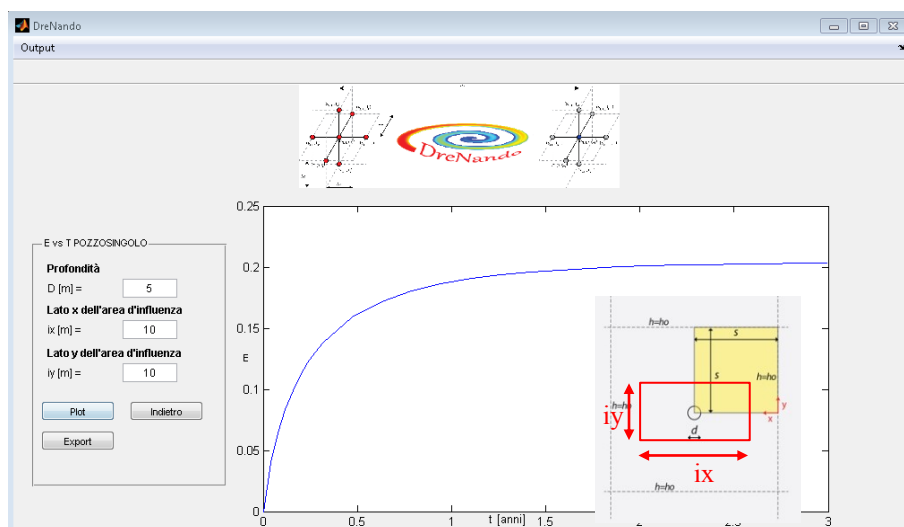


Figura 6.24: esempio di output “efficienza vs tempo” per il pozzo isolato.

6.4.4 Aste a raggiera

La sezione dedicata al sistema di aste a raggiera prevede 3 funzioni di output: superficie piezometrica, slice u, efficienza vs tempo.

6.4.4.1 Superficie piezometrica

La funzione “superficie piezometrica” consente di ottenere una visualizzazione tridimensionale delle pressioni neutre che si ottengono su una assegnata superficie parallela al piano campagna. In figura 6.25 viene riportato un esempio della schermata che si ottiene.

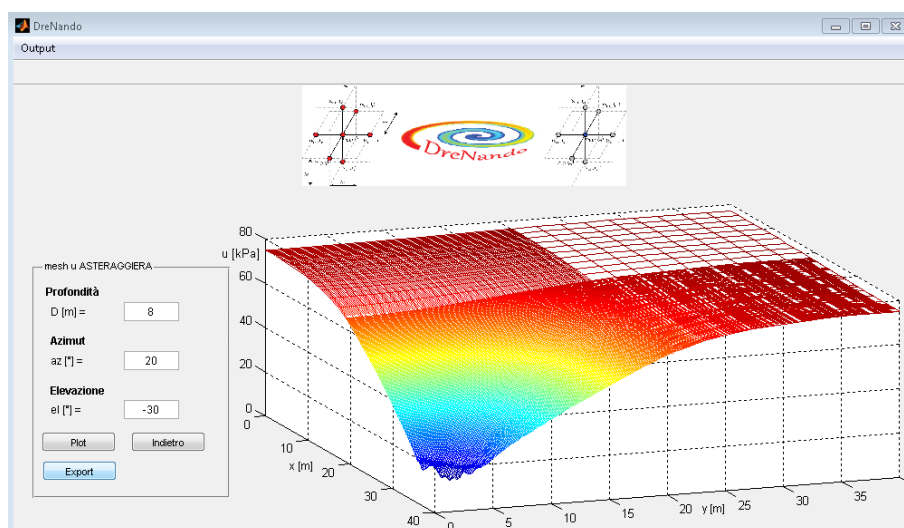


Figura 6.25: esempio di output “superficie piezometrica” per le aste a raggiera.

L'unico dato di input che si richiede è la profondità D della superficie considerata dal piano campagna. Le impostazioni di azimuth e di elevazione possono essere modificate a piacimento per ottenere una rotazione tridimensionale del grafico. Una volta definiti i parametri, il tasto *plot* genera il grafico. Per ottenere i dati in formato tabellare è possibile cliccare sulla tasto *export*. Dalla schermata che si apre è possibile, inoltre, esportare gli stessi dati in formato *.xls* e *.txt*. Tramite questa funzione, modificando volta per volta il parametro D , si può ottenere il valore numerico della pressione neutra in ogni punto in cui viene discretizzato il dominio.

6.4.4.2 Slice u

La funzione “*slice u*” consente di ottenere uno spaccato tridimensionale del dominio delle pressioni neutre e di leggerne i relativi valori facendo riferimento all'apposita legenda dei colori. In figura 6.26 è riportato un esempio della rappresentazione fornita da tale funzione. Gli unici dati di input richiesti sono le coordinate x , y e z dei piani che sezionano il dominio. Azimut ed elevazione consentono inoltre una rotazione dell'immagine a 360°.

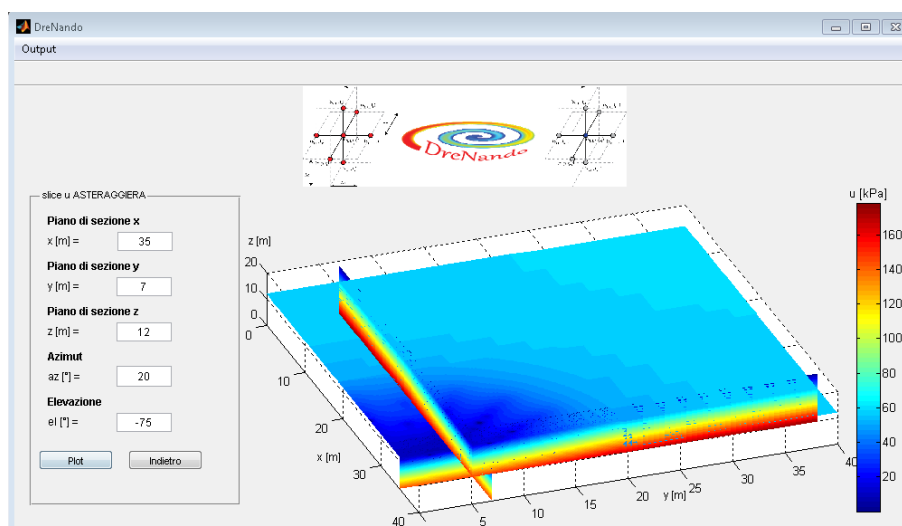


Figura 6.26: esempio di output “*slice u*” per le aste a raggiera.

6.4.4.3 Efficienza vs tempo

La funzione “*efficienza vs tempo*” permette di visualizzare l'evoluzione dell'efficienza media, in funzione del tempo, scegliendo la profondità e l'area della superficie sulla quale viene calcolata (figura 6.27). L'area è considerata rettangolare ed il suo centro coincide con il vertice verso cui convergono le aste (ovvero l'asse del pozzo dalla cui superficie si ipotizza che partano le aste). Le dimensioni dei suoi due lati possono essere assegnate attraverso i parametri “ l_x ” ed “ l_y ”. Per ottenere i dati del grafico in formato tabellare è possibile cliccare sulla tasto *export*. Dalla schermata che si apre (analogica a quella in figura 6.13) è possibile esportare gli stessi dati sia in formato *.xls* che *.txt*.

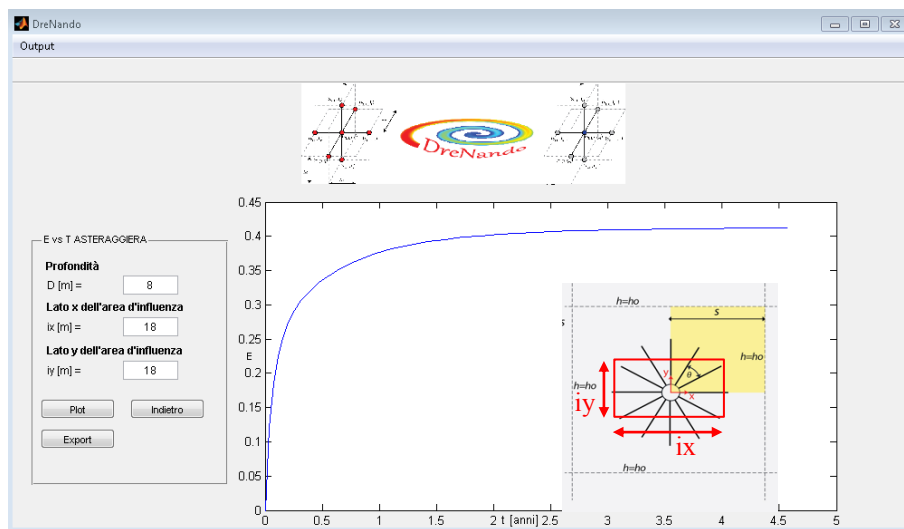


Figura 6.27: esempio di output “efficienza vs tempo” per le aste drenanti.

6.4.5 Batteria di aste

La sezione dedicata alle batterie di prevede 3 funzioni di output: superficie piezometrica, slice u, efficienza vs tempo.

6.4.5.1 Superficie piezometrica

La funzione “superficie piezometrica” consente di ottenere una visualizzazione tridimensionale delle pressioni neutre che si ottengono su una assegnata superficie parallela al piano campagna. In figura 6.28 viene riportato un esempio della schermata che si ottiene.

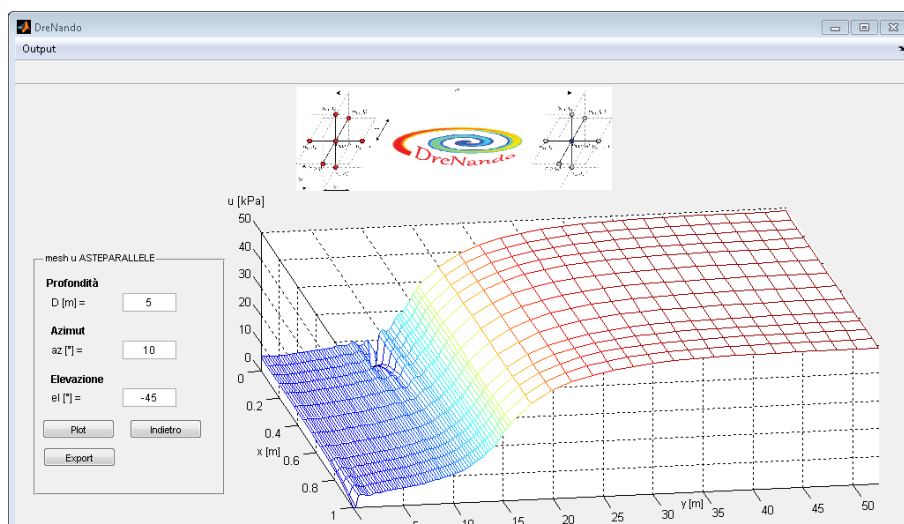


Figura 6.28: esempio di output “superficie piezometrica” per le aste a raggiera.

L'unico dato di input che si richiede è la profondità D della superficie considerata dal piano campagna. Le impostazioni di azimuth e di elevazione possono essere modificate a piacimento per ottenere una rotazione tridimensionale del grafico. Una volta definiti i parametri, il tasto *plot* genera il grafico. Per ottenere i dati in formato tabellare è possibile cliccare sulla tasto *export*. Dalla schermata che si apre è possibile, inoltre, esportare gli stessi dati in formato *.xls* e *.txt*. Tramite questa funzione, modificando volta per volta il parametro D , si può ottenere il valore numerico della pressione neutra in ogni punto in cui viene discretizzato il dominio.

6.4.5.2 Slice u

La funzione “*slice u*” consente di ottenere uno spaccato tridimensionale del dominio delle pressioni neutre e di leggerne i relativi valori facendo riferimento all'apposita legenda dei colori. In figura 6.29 è riportato un esempio della rappresentazione fornita da tale funzione. Gli unici dati di input richiesti sono le coordinate x , y e z dei piani che sezionano il dominio. Azimut ed elevazione consentono inoltre una rotazione dell'immagine a 360°.

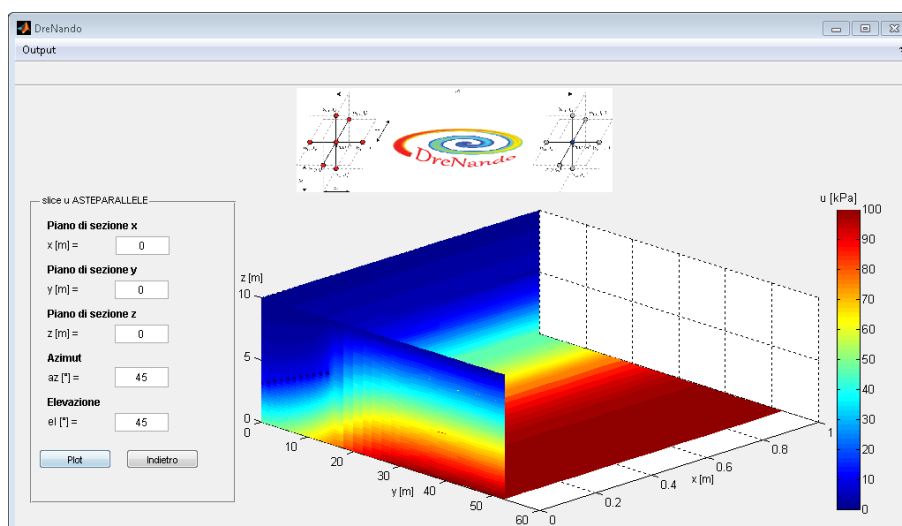


Figura 6.29: esempio di output “*slice u*” per le aste a raggiera.

6.4.5.3 Efficienza vs tempo

La funzione “*efficienza vs tempo*” permette di visualizzare l'evoluzione dell'efficienza media, in funzione del tempo, scegliendo la profondità e l'area della superficie sulla quale viene calcolata (figura 6.30). L'area è considerata rettangolare. Uno dei suoi lati è fisso ed pari all'interasse tra due aste adiacenti, mentre l'altro lato (nella direzione dello sviluppo longitudinale delle aste) può essere scelto attraverso il parametro l_y . Per ottenere i dati del grafico in formato tabellare è possibile cliccare sulla tasto *export*. Dalla schermata che si apre (analoga a quella in figura 6.13) è possibile esportare gli stessi dati sia in formato *.xls* che *.txt*.

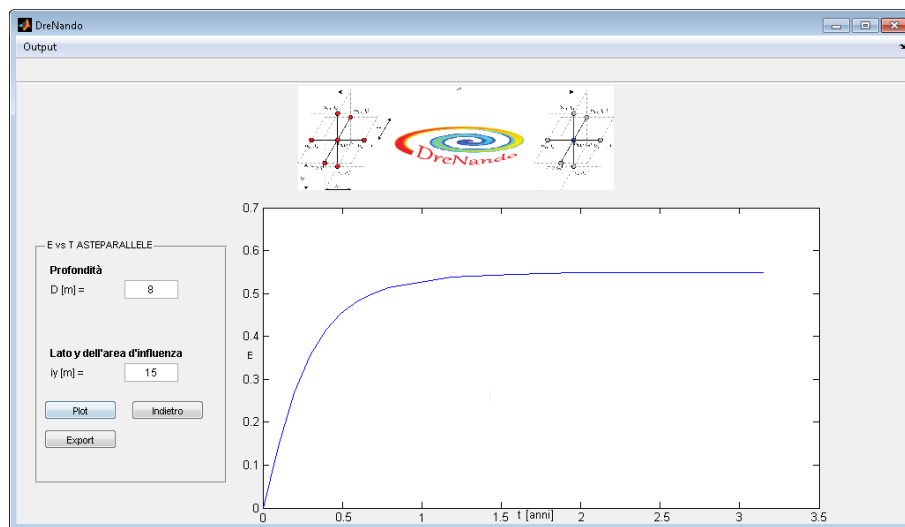


Figura 6.30: esempio di output “efficienza vs tempo” per le aste drenanti.

Conclusioni

I drenaggi sono fra gli interventi di stabilizzazione attivi più usati nel caso di scivolamenti e colate in terreni a grana fine saturi. La loro azione produce un incremento delle forze resistenti necessarie a garantire l'equilibrio della massa instabile, attingendo solamente alle risorse intrinseche di resistenza del terreno. Il limite più importante risiede nella difficoltà realizzativa di tali opere nel caso di superfici di scorrimento profonde. L'analisi della letteratura, unita ad alcuni studi preliminari ha mostrato che l'unica tecnologia in grado di superare questi limiti è quella dei pozzi drenanti di piccolo-medio diametro. infatti:

- l'utilizzo di tecnologie di comprovata affidabilità come la realizzazione dello scavo attraverso trivelle permette il raggiungimento di superfici di scorrimento molto profonde, cosa che invece diventa complessa con altre tecnologie;
- l'utilizzo del geo-composito drenante disposto lungo il contorno del cavo permette di riutilizzare il materiale scavato in sito come riempimento, risparmiando notevolmente sui costi di trasporto a discarica del materiale estratto dalla perforazione;
- la possibilità di realizzare un'armatura consistente e di utilizzare calcestruzzo (sempre all'interno di un cilindro di geo-composito drenante) lascia spazio all'ipotesi di poter realizzare un intervento ibrido tra un'opera di drenaggio ed un'opera di sostegno, riducendo ulteriormente i costi quando vi sia bisogno di un accoppiamento tra le due tipologie;
- l'utilizzo di un sistema discreto permette il superamento di eventuali vincoli progettuali che un'opera continua non potrebbe rispettare, come strade, condotte ecc.

I vantaggi appena descritti hanno permesso ai pozzi drenanti di trovare ampia diffusione negli anni passati. Tuttavia una serie di problemi di sicurezza ha causato un forte rallentamento nello sviluppo della tecnica, ed un conseguente raffreddamento dell'interesse da parte della comunità scientifica e tecnica. Tutto ciò ha generato un divario tra le tecniche disponibili per il dimensionamento di altre opere drenanti (trincee e dreni sub-orizzontali) e i pozzi. Le prime possono essere agevolmente progettate, ricorrendo a metodi semplificati, che si basano sull'utilizzo di abachi adimensionali. Il dimensionamento dei pozzi, invece, si basa ancora su procedure poco chiare, fondate su ipotesi inconsistenti.

Pertanto l'obiettivo del presente lavoro è stato analizzare il comportamento del sistema di pozzi drenanti per ottimizzarne la progettazione e fornire degli strumenti, pratici e semplificati, per il dimensionamento del sistema.

A tal proposito è stato sviluppato un codice di calcolo autonomo che, lavorando in ambiente Matlab, permette di integrare l'equazione della consolidazione in regime tridimensionale,

grazie al metodo delle differenze finite. In particolare il codice è basato sul Metodo di Eulero Esplicito che adotta: una approssimazione della derivata prima nel tempo alle differenze in avanti, una approssimazione della derivata seconda nello spazio alle differenze centrali.

Per ridurre il più possibile l'onere computazionale, imposto dal soddisfacimento della condizione di stabilità, è stato ridotto considerevolmente il numero di punti in cui viene discretizzato il dominio. L'obiettivo è stato raggiunto utilizzando una formulazione modificata del suddetto metodo in grado di considerare una mesh variabile.

La schema geometrico studiato è una porzione di pendio indefinito, inclinato e delimitato inferiormente da una superficie impermeabile. Il terreno è drenato da una rete di pozzi anch'essa indefinita. In questo modo è possibile considerare opportuni piani di simmetria che riducono ulteriormente il volume considerato e, di conseguenza, l'onere di calcolo.

E' stata eseguita una serie di analisi di calibrazione sia per la dimensione degli elementi della mesh, che per il rapporto tra lunghezza ed altezza del dominio di calcolo considerato.

La validazione del codice è stata ottenuta adattando il modello a riprodurre alcune soluzioni analitiche, disponibili in letteratura, per un analogo problema di diffusione del calore.

Una volta calibrato e validato il modello è stata dapprima calcolata l'efficienza del sistema al variare della forma della maglia definita dalla distribuzione di pozzi, a parità di area della maglia stessa; è poi stata prodotta una serie di abachi per il dimensionamento del sistema drenante. Tali abachi sono relativi al caso di maglie quadrate, condizione questa per cui risultano massime le prestazioni dell'opera. Il comportamento del sistema è analizzato in condizioni stazionarie nell'ipotesi di: sotto-sistema idraulico disaccoppiato da quello meccanico, terreno saturo, omogeneo ed isotropo nei confronti della permeabilità ed apporto di acqua continuo in superficie tale da determinare la presenza di una lama d'acqua. Per l'analisi della condizione transitoria è stata considerata una condizione iniziale con moto di filtrazione parallelo al piano campagna.

I risultati delle analisi hanno mostrato che l'efficienza del sistema si riduce quando aumenta il rapporto tra volume drenato e volume drenante. Inoltre, a parità di tale rapporto, l'efficienza si riduce considerando superfici di scorrimento più profonde. Questo aspetto, già noto in letteratura, è di certo un notevole incentivo all'utilizzo di tecnologie drenanti che, come i pozzi, sono adatte a raggiungere la superficie di scorrimento.

Il codice è stato, in seguito, modificato per analizzare il comportamento del sistema in presenza di fluttuazione stagionali della falda. La condizione di lama d'acqua è stata sostituita con una condizione di pressione neutra variabile nel tempo con legge sinusoidale. La nuova condizione assunta al piano campagna ha reso necessaria una modifica della condizione relativa ai pozzi. In particolare la superficie drenante è stata trattata come superficie di filtrazione.

L'effetto del sistema sulle fluttuazione delle pressioni neutre è stato indagato facendo variare l'interesse tra i pozzi, il coefficiente di consolidazione e l'ampiezza delle oscillazioni. In particolare sono stati confrontati gli involuppi dei valori massimi, minimi e medi delle

pressioni neutre (in funzione della profondità), che si ottengono quando il sistema è entrato in esercizio, con gli stessi inviluppi già ottenuti in assenza di dreni.

Lo studio mostra che drenaggi inducono una riduzione delle oscillazioni stagionali superiore rispetto a quanto accade in condizioni naturali. Il suddetto effetto benefico cresce riducendo l'interasse tra i pozzi. Inoltre le ampiezze delle oscillazioni si riducono sulle superfici più profonde e per coefficienti di consolidazione via via minori, finché gli inviluppi si possono confondere con i valori medi delle pressioni neutre, che dipendono solamente dalla posizione media del pelo libero della falda.

Successivamente gli inviluppi dei massimi valori di pressioni neutre, ottenuti in condizioni al contorno variabili, sono stati confrontati con le pressioni neutre derivanti dall'ipotesi canonica di lama d'acqua al piano campagna, a parità di tutti gli altri fattori in gioco.

I risultati hanno evidenziato che le analisi per condizione al contorno variabile, consentendo una valutazione più accurata delle pressioni neutre, permettono l'ottimizzazione del progetto dei drenaggi, basato sull'inviluppo delle massime pressioni neutre previste, che rappresenta comunque un approccio sicuro.

Infine il codice è stato dotato di un interfaccia grafica, semplice ed intuitiva, e inserito all'interno di un programma eseguibile e distribuibile: il software DreNando. Oltre al sistema di pozzi a "rete", tale software consente di simulare il processo di consolidazione/filtrazione nel caso di un pozzo singolo, oppure di altre tecnologie drenanti come trincee e batterie di aste. Per ciascuna tecnologia sono state implementate funzioni che permettono una diversa rappresentazione degli output. Il software offre inoltre la possibilità di esportare i valori delle pressioni neutre in ciascun punto della mesh.

Bibliografia

- Aloi F. (2012). "Valutazione dell' efficienza di un sistema di pali drenanti per la stabilizzazione dei pendii". Tesi di Laurea, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale. Università degli studi di Napoli Federico II.
- Aloi F., Pirone M., Urciuoli G. (2013). "Confronto fra l'azione di trincee e pali drenanti". Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2013 - IARG 2013, 16-18 Settembre 2013, Perugia (Italy).
- Beer P., Hegg U. e Manassero V. (1992). "Landslide stabilization at Ancona, Italy, by deep drainage wells". 6th International Symposium on Landslides, Christchurch (Nuova Zelanda). 10-14 febbraio. pp. 663-670
- Bianco B. (1983). "Interventi per la riduzione delle pressioni interstiziali nei pendii instabili". Geologia Applicata e Idrogeologia, Bari 1979, Vol. XIV/3.
- Bianco B. (1988). "Landslide stabilization by means of drainage tunnels in central Italy". 5th International Symposium on Landslides, Losanna (Svizzera), 10-15 luglio. Balkema, pp. 857-862.
- Biot M.A. (1941). "General theory of three-dimensional consolidation". Journal of Applied Physics, Vol. 12, No 2, pp 155-164.
- Bromhead E. N. (1984). "An analytical solution to the problem of seepage into counterfort drains". Canadian Geotechnical Journal, 21(4). 657-662.
- Burghignoli A., Desideri A. (1987). "On the effectiveness of tubular drains. IX Europ. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Dublin. Vol. I, pp. 149-152.
- Capacetta M. (2006). "Applicazioni del directional drilling nei lavori di drenaggio di versanti in frana". Giornata di studio sui Sistemi drenanti nei dissesti del territorio. Università di Torino, Facoltà di Agraria. Grugliasco, 7 aprile.
- Carslaw H. S., Jaeger J.C. (1959). "conduction of heat in solids (second edition)". Oxford University Press.
- Collotta T., Manassero V. e Moretti P.C. (1988). "An advanced technology in deep drainage of slopes". 5th International Symposium on Landslides, Losanna (Svizzera), 10-15 luglio. Balkema. pp. 887-892.
- D'acunto. (2012). "Computational Partial Differential Equations for Engineering Science". Nova science publishers, New York.
- D'Acunto B., Urciuoli G. (2006). "Groundwater regime in a slope stabilised by drain trenches. Mathematical and Computer Modelling". Pergamon-Elsevier Science LTD, 43(7-8), 754-765.
- Desideri A., Miliziano S., Rampello S. (1997). "Drenaggi a Gravità per la Stabilizzazione dei Pendii". Hevelius Edizioni, Benevento.
- Desideri A. e Rampello S. (2009). "Stabilizzazione dei pendii mediante sistemi di drenaggio". XXII Ciclo di Conferenze di Geotecnica di Torino. Politecnico di Torino, 18-19 novembre.
- Di Maio C., Evangelista A., Viggiani C. (1988). "Analisi dell'efficienza di sistemi di dreni tubolari". Rivista Italiana di Geotecnica, Vol. 12 (4), 187-199.
- Di Maio C., Santagata P., Viggiani C. (1986). "Analisi del processo di consolidazione indotto da un sistema di trincee drenanti". Atti XVI Conv. Nazionale di Geotecnica, Bologna, 3, 283-289.

- Dupuit J. (1863). "Études Théoriques et Pratiques sur le Mouvement des Eaux dans les Canaux Découverts et à Travers les Terrains Perméables". Dunod, Paris.
- HDD Consortium. (2004). "Horizontal Directional Drilling Good Practices Guidelines". ISBN: 1-928984-13-4. North American Society for Trenchless Technology.
- Hutchinson, J.N. (1977). "Assessment of the effectiveness of corrective measures in relation to geological conditions and types of slope movement (General Report)". Bulletin of the Int. Association of Engineering Geology 16: 131-155.
- Kenney T.C., Pazin M., Choi W.S (1977). "Design of horizontal drains for soil slopes". ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division, 103(GT11), 1311-1323.
- Lazzari L. e Manassero V. (1994). "Protezione catodica di strutture zincate interrato". Conferenze dell'Associazione Metallurgica Italiana, Milano (Italia).
- Leoni F, e Manassero V. (2003). "Consolidamento e rinforzo dei pendii in terra". XIX Ciclo di Conferenze di Geotecnica di Torino. Politecnico di Torino, 4-6 novembre.
- Manassero V. (2001). "Il consolidamento dei pendii mediante drenaggio profondo". Convegno su rilevamento e tutela del territorio. Hydrogeo, Rimini 9-11 May, Maggioli Ed., 483-496.
- Manassero V., Icotecne (2011). "Nuove tecnologie per sistemi di drenaggio e ancoraggio". Conferenza di Geotecnica di Torino XXIII ciclo, 23-24 Novembre 2011.
- Nakamura H.(1988). "Landslide control works by horizontal drainage works". V Int. Symposium on Landslides, Lausanne, vol.2, pp.495-500
- Nonveiller E.(1981). "Efficiency of horizontal drains on slope stability". Proc.X.ICSMFE, Stockholm, 3, 495-500.
- Peng H. Y., Yeh H. D., Yang S. H. (2002). "Improved numerical evaluation of the radial groundwater flow equation" Advances in Water Resources. Volume 25, Issue 6, June 2002, Pages 663–675.
- Pun W.K., Urciuoli G. (2008). Soil nailing and subsurface drainage for slope stabilization. Keynote paper in: 10th International Symposium on Landslides and Engineering Slopes, June 30 ~ July 4, 2008, Xi'an, China.
- Righi P. V., Marchi G., Dondi G. (1986). "Stabilizzazione mediante pozzi drenanti di un movimento franoso nella città di Perugia". XVI Convegno nazionale di Geotecnica. Bologna, 14-16 maggio. AGI. pp. 101-110.
- Stanic B. (1984). "Influence of drainage trenches on slope stability". ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, 110, 11, 1624-1635.
- Urciuoli G., Pirone M. (2013). "Subsurface Drainage for Slope Stabilization". Landslide Science and Practice, Vol. 6, pp 577-586